

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

Josip Kobeščak

Zagreb, 2011.

## Izjava

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno i odgovorno, uz stručnu pomoć Prof. dr. sc. Ivice Smojvera. Pri izradi diplomskog rada koristio sam se znanjem stečenim tijekom studija kao i navedenom literaturom.

---

Josip Kobeščak

---

*Želio bih zahvaliti svom mentoru Prof. dr. sc. Ivici Smojveru na pomoći, savjetima, komentarima i vremenu utrošenom za izradu ovog rada. Također velika zahvala kolegi Darku Ivančeviću, mag.ing. na pomoći pri izradi modela krila u Abaqusu. Najveću zahvalu zaslužuju moji roditelji koji su mi pružili neizmjernu potporu, ljubav i razumijevanje kroz studij. Ovaj rad posvećujem svojoj budućoj supruzi Moniki i našem još nerođenom sinu Franu.*

---

# Sadržaj

---

1.	Sažetak	
2.	Uvod.....	1
2.1.	Biomimetika .....	1
2.2.	Poznati slučajevi biomimetike .....	2
3.	Pregled bioloških letućih sustava.....	4
3.1.	Uvod .....	4
3.2.	Konstrukcija ptice .....	5
3.2.1.	Krilo ptice .....	5
3.2.1.1.	Unutarnja konstrukcija krila .....	6
3.2.1.2.	Vanjska konfiguracija krila.....	8
3.2.1.3.	Konstrukcija krila malih ptica.....	10
3.2.1.4.	Konstrukcija krila velikih ptica poput albatrosa.....	11
3.2.1.5.	Dinamičke karakteristike krila.....	12
3.2.1.5.1	Uređaji za povećanja uzgona.....	12
3.2.2.	Tijelo i kostur ptice.....	15
3.2.3.	Opis i konstrukcija pera .....	17
3.2.3.1.	Mehanička svojstva pera .....	19
3.2.4.	Muskulatura.....	21
4.	Načini leta ptice.....	23
4.1.	Jedrenje .....	24
4.1.1.	Dinamičko jedrenje .....	24
4.2.	Mahanje.....	25
4.3.	Krstarenje .....	29
4.4.	Isprekidan let.....	30

4.5.	Lebdjenje .....	31
4.6.	Polijetanje i slijetanje .....	32
5.	Model krila albatrosa.....	33
5.1.	Krilo albatrosa .....	34
5.2.	Model krila u Pro/ENGINEER-u .....	36
5.3.	Model krila u Abaqus-u .....	37
5.4.	Rubni uvjeti i opterećenje krila .....	39
5.5.	Materijal .....	40
6.	Rezultati analize.....	43
6.1.	Linearna analiza čvrstoće stvarnog krila albatrosa .....	44
6.2.	Linearna analiza čvrstoće prvog tehničkog sustava.....	46
6.3.	Linearna analiza čvrstoće drugog tehničkog sustava.....	47
6.4.	Nelinearna analiza stvarnog sustava .....	49
6.5.	Nelinearna analiza prvog tehničkog sustava.....	51
6.6.	Nelinearna analiza drugog tehničkog sustava.....	52
6.7.	Usporedba rezultata.....	55
7.	Zaključak.....	57
8.	Literatura.....	59

# Popis slika

---

Slika 2.2.1 Čičak traka [1] .....	2
Slika 2.2.2. Prikaz mikroskopske površine cvijeta lotusa [2].....	3
Slika 2.2.3 Bionički automobil proizvođača Mercedes-Benz [3] .....	3
Slika 3.2.1 Kostur krila ptice s vidljivim glavnim mišićem koji se koristi pri mahanju [4] .....	7
Slika 3.2.2 Oblik kostura raznih krila ptica a) kolibrić, b) golub, c) tetrijeb, d) čvorak, e) albatros [4] .....	8
Slika 3.2.3 Kategorije pera na krilu ptice [6] .....	9
Slika 3.2.4 Poprječni presjek krila sjevernog jastreba [4] .....	10
Slika 3.2.5 Mehanizam uklještenja krila albatrosa [4] .....	12
Slika 3.2.6 Primjeri pomoćnih uređaja za ostvarivanje uzgona na krilu ptice. [5] .....	14
Slika 3.2.7 Kostur ptice [7] .....	15
Slika 3.2.8 Grafički prikaz opstrujavanja ptice u zračnom tunelu a) mrtva ptica, b) živa ptica [8] .....	16
Slika 3.2.9 Pera [9].....	17
Slika 3.2.10 Prikaz pera sa svim važnim gradivim elementima [10].....	18
Slika 3.2.11 Prikaz promjene poprečnog presjeka pera [8] .....	18
Slika 3.2.12 Prikaz mišića ptice ostvaren pomoću elektromagnetskog zračenja [4] ....	21
Slika 4.1.1 Princip dinamičkog jedrenja [13].....	25
Slika 4.2.1 Djelovanje aerodinamičkih sila u mahanju [5] .....	28
Slika 4.2.2 Pokreti krila prilikom mahanja [5] .....	28
Slika 4.2.3 Zatvorena kontura koju tvore vrhovi krila prilikom mahanja [5] .....	29
Slika 4.4.1 Isprekidani način leta ptice a) mahanje-jedrenje, b) mahanje-balistička faza [8] .....	30
Slika 4.5.1 Grafički prikaz mahanja kolibrića [4] .....	31
Slika 5.1.1 Albatros u letu [14] .....	34
Slika 5.1.2 Konstrukcija albatrosa [14] .....	35
5.2.1 Dimenzije krila albatrosa [15] .....	36
5.2.2 Model krila albatrosa u Pro/ENGINEER-u.....	36

5.3.1 Krilo albatrosa podijeljeno na površine u Abaqus-u.....	37
5.3.2 Kost i pera krila albatrosa u Abaqus-u.....	37
5.3.3 Mreža konačnih elemenata modela krila.....	38
5.3.4 Mreža konačnih elemenata modela krila podijeljena na tri cjeline.....	38
5.4.1 Rubni uvjeti modela krila.....	39
Slika 6.1.1 Ekvivalentno naprezanje stvarnog krila prema V.Mises-u .....	44
Slika 6.1.2 Pomaci stvarnog krila .....	44
Slika 6.1.3 Pomaci stvarnog krila .....	45
Slika 6.1.4 Naprezanja krila u grednim elementima stvarnog krila.....	45
Slika 6.2.1 Ekvivalentno naprezanja krila prvog tehničkog sustava prema V. Mises-u .....	46
Slika 6.2.2 Pomaci krila prvog tehničkog sustava.....	46
Slika 6.2.3 Pomaci krila prvog tehničkog sustava.....	47
Slika 6.2.4 Naprezanja krila u grednim elementima prvog tehničkog sustava.....	47
Slika 6.3.1 Ekvivalentno naprezanja krila drugog tehničkog sustava prema V. Mises-u .....	48
Slika 6.3.2 Pomaci krila drugog tehničkog sustava .....	48
Slika 6.3.3 Pomaci krila drugog tehničkog sustava. Prikaz sa faktorom povećanja 3. ....	48
Slika 6.3.4 Naprezanja krila u grednim elementima drugog tehničkog sustava .....	49
Slika 6.4.1 Ekvivalentno naprezanje stvarnog krila prema V.Mises-u .....	49
Slika 6.4.2 Pomaci stvarnog krila .....	50
Slika 6.4.3 Pomaci stvarnog krila .....	50
Slika 6.4.4 Naprezanja krila u grednim elementima stvarnog krila.....	50
Slika 6.5.1 Ekvivalentno naprezanje prvog tehničkog sustava prema V.Mises-u .....	51
Slika 6.5.2 Pomaci krila prvog tehničkog sustava.....	51
Slika 6.5.3 Pomaci krila prvog tehničkog sustava.....	52
Slika 6.5.4 Naprezanja krila u grednim elementima prvog tehničkog sustava.....	52
Slika 6.6.1 Ekvivalentno naprezanje drugog tehničkog sustava prema V.Mises-u .....	53
Slika 6.6.2 Pomaci krila drugog tehničkog sustava .....	53
Slika 6.6.3 Pomaci krila drugog tehničkog sustava. Prikaz sa faktorom povećanja 3. ....	54
Slika 6.6.4 Naprezanja krila u grednim elementima drugog tehničkog sustava .....	54
Slika 6.6.5 Čvor spoja kosti <i>humerus</i> i <i>ulna</i> .....	56

# Popis tablica

---

Tablica 3.2.1 Energetska gustoća bioloških goriva [4].....	22
Tablica 4.2.1 Reynoldsovi brojevi i frekvencije mahanja za razne životinje [5] .....	26
Tablica 5.1.1 Geometrijske karakteristike pojedinih ptica [5] .....	35
Tablica 5.5.1 Svojstva materijala kosti i keratina.....	40
Tablica 5.5.2 Svojstva materijala polikarbonat i aluminij .....	41
Tablica 5.5.3 Svojstva homogeniziranog kompozitnog materijala drugog tehničkog sustava.....	42
Tablica 6.6.1 Rezultati linearne i nelinearne analize .....	56
Tablica 6.6.2 Pomak čvora u spoju kosti <i>humerus</i> i <i>ulna</i> .....	56



# Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
$m$	kg	Masa
$m_w$	kg	Masa krila ptice
$b$	m	Raspon krila ptice
$S$	m <sup>2</sup>	Površina
$\alpha$	°	Napadni kut
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća
$C_{Do}$	-	Koeficijent aerodinamičkog otpora krila
$E$	GPa	Modul elastičnosti izotropnog materijala
$E_{ij}, i, j = 1, 2, 3$	GPa	Moduli elastičnosti u pravcu glavnih materijalnih osi
$E_{eq}$	GPa	Ekvivalentni modul elastičnosti
$G$	GPa	Modul smicanja izotropnog materijala
$G_{ij}, i, j = 1, 2, 3$	GPa	Moduli smicanja s obzirom na glavne materijalnih osi
$G_{eq}$	GPa	Ekvivalentni modul smicanja
$\nu$	-	Poissonov koeficijent
$\nu_{ij}, i, j = 1, 2, 3$	-	Poissonovi koeficijenti s obzirom na glavne materijalnih osi
$\Theta$	°	Postavni kut jednousmjernih kompozitnih slojeva u odnosu na globalni koordinatna sustav

# 1. Sažetak

---

Ovaj rad zasniva se na pregledu bioloških letećih sustava. U prvom dijelu rada prikazani su svi važniji konstrukcijski elementi bioloških letećih sustava koji se uglavnom svode na ptice. Ostale životinje nisu analizirane već su prikazani podaci koji služe samo kao usporedba pticama. Drugi dio rada prikazuje posebne načine leta ptica.

Treći dio rada se bavi numeričkom analizom opterećenja krila albatrosa. Numerička analiza izvedena je pomoću programa Abaqus dok je model krila izveden u programu Pro/ENGINEER. Cilj rada je usporedba stvarnog biološkog sustava s tehničkim sustavom koji se može proizvesti u današnje vrijeme, te usporedba s tehničkim sustavom koji bi mogao biti izrađen u narednih deset godina.

U zadnjem poglavlju prikazani su rezultati analiza te je dana usporedba dobivenih naprezanja i pomaka za sve tri analize.

## 2. Uvod

---

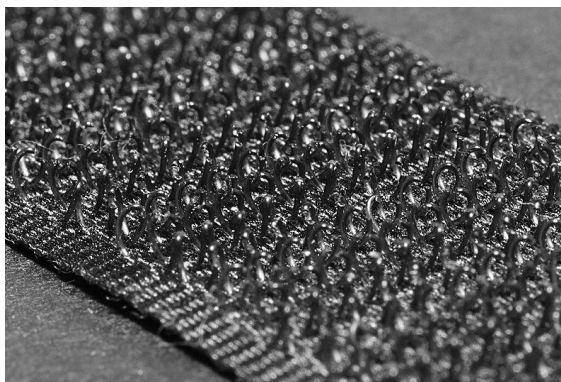
### 2.1. Biomimetika

Bionika (poznata kao biomimetika, biomimikrija, bio-inspiracija) je područje tehničkih znanosti koje proučava biološke sustave iz prirode, koje pri tome pokušava primijeniti u razvoju novih tehnoloških sustava. Istraživači i inženjeri sve više se okreću prirodi za odgovore pri razvoju novih tehničkih sustava što ne čudi obzirom da su neka od najvećih ljudskih ostvarenja upravo proizišla iz kopiranja biološkog svijeta. Razlog potrage za odgovorima i inspiracijom u prirodi ne čudi obzirom da se sva flora i fauna tisućama godina usavršavala u nastojanju da postane što konkurentnija u vlastitom prirodnom okruženju. Bionika kao termin prvi put se spominje 1958. godine, a sama riječ u engleskom obliku ima značenje *bionics* gdje „*bion*“ predstavlja grčku riječ *bion* što znači život, a dodatak „*cs*“ predstavlja riječ kao ili slično što znači da bi prijevod same riječi bionika značio "kao život". U nekim rječnicima objašnjava se kako je riječ bionika nastala od spajanja dviju riječi biologija i elektronika. Primjera u današnjoj tehnologiji koji su proizašli iz proučavanja flore i faune ima na pretek pa se neka već smatraju toliko jednostavnim i banalnim, ali su svejedno nastala upravo ljudskom idejom prilikom promatranja bioloških sustava. Za razliku od bionike koja predstavlja općenito kopiranje bioloških sustava iz prirode, biomimetika označava sustave pri kojima se kopira sam kemijski sastav flore

ili faune što obično označava kopiranje molekularnog oblika i sastava materijala iz prirode. U današnje vrijeme termini biomimetika ili biomimikrija više se preferiraju u tehničkom području kako bi se izbjegla zabuna riječi bionika koja se koristi u medicini. Zbog toga će se i u ovom radu dalje koristiti izraz biomimetika obzirom da sva dostupna tehnička literatura općenito naginje ovom izrazu.

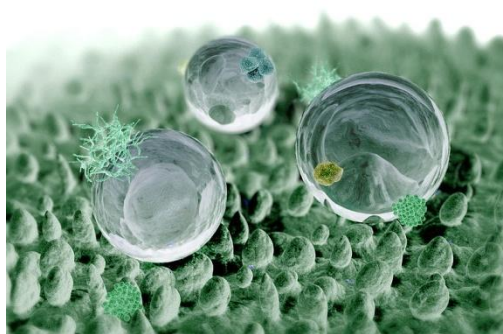
## 2.2. Poznati slučajevi biomimetike

Najpoznatiji slučaj biomimetike je takozvana čičak traka prikazana na slici 2.2.1 koju je 1941. godine izumio švicarski inženjer George de Mestral kojemu je ideja došla prilikom četkanja psa čija je dlaka bila puna cvjetova biljke čička.



Slika 2.2.1 Čičak traka [1]

Lotus efekt je također poznati sustav kopiran iz prirode pri kome se proučavalo kako cvijet biljke lotusa uvijek ima potpuno čistu površinu koju ostvaruje tako da ima mikroskopske izbočine po površini vidljive na slici 2.2.2 koje mu omogućuju da se čestice vode ne zadržavaju već skliznu, a pri tome i pokupe sve nečistoće sa cvijeta. Proizvedeni su razni kemijski preparati s kojima se mogu tretirati površine plastike ili metala kako bi se postigao upravo takozvani "lotus efekt".



**Slika 2.2.2. Prikaz mikroskopske površine cvijeta lotusa [2]**

Jedan od poznatijih automobilskih proizvođača Mercedes-Benz predstavio je 2005. godine koncept automobil u potpunosti nalik na tropsku ribu koja je svojim oblikom drastično smanjila aerodinamički otpor automobilu i samo time poboljšala energetske iskoristivost automobila za 20%. Na slici 2.2.3. je vidljiv futuristički oblik automobila koji je pomogao razvoju novih aerodinamički boljih automobila. Mercedes-Benz je objavio podatak da je auto postigao koeficijent otpora  $C_D$  od samo 0.195 što je samo malo iznad sportskih automobila.



**Slika 2.2.3 Bionički automobil proizvođača Mercedes-Benz [3]**

Glavni razlog kopiranja prirode i njezinih izvanrednih stvorenja je upravo poboljšanje efikasnosti u svim poljima tehnologije od zrakoplovstva, strojarstva, građevinarstva te svih ostalih područja razvoja novih proizvoda i dobara.

## 3. Pregled bioloških letećih sustava

---

### 3.1. Uvod

Ako bi usporedili današnje moderne zrakoplove s pticama lako bi došli do zaključka kako ljudska tehnologija još uvijek zaostaje za savršeno optimiziranim pticama koji su po svojim aerodinamičkim karakteristikama superiorne ljudskim dostignućima na ovom području. Naravno da se ptice ne mogu nadmetati s brzinama i visinama koje postižu zrakoplovi, međutim faktor upravljivosti i energetske efikasnosti koji se pokazuje kao možda i najvažniji faktor u budućem razvoju zrakoplova je daleko na strani ptica, koje mogu sa samo par grama goriva preletjeti oceane.

Upravo ovaj razlog doveo je do toga da znanstvenici sve više promatraju život ptica, njihova kretanja, metode i načine leta ali isto tako i samu konstrukciju krila, pera i ostalih bitnih konstrukcijskih dijelova. Prvi zrakoplov braće Wright također je imao krila koja su simulirala krila ptica kao uzgonsku površinu i taj jednostavan koncept koristi se i na današnjim modernim zrakoplovima. Ptice su posebno evoluirana biološka stvorenja koja koriste prednje noge kao krila za let. Osnovni model četveronožaca je prilagođen kako bi zadovoljio specijalne zahtjeve potrebne za let. Prirodni odabir i evolucija razvili su kroz tisuće godina poseban organizam kojemu su svi ekstremiteti izmijenjeni kako bi se zadovoljili zahtjevni uvjeti potrebni za let ptica kakav danas poznajemo.

## 3.2. Konstrukcija ptice

Obzirom da u prirodi ne postoje bolji letači od ptica ovaj diplomski rad temeljit će se isključivo na proučavanje konstrukcija ptica i njihovih vitalnih dijelova. Ostale životinje poput šišmiša, insekata, letućih vjeverica bit će samo spomenute kao usporedba pticama.

Konstruktivski gledano ptice imaju lakši kostur od ostalih životinja prvenstveno zbog posebno razvijenih šupljih kostiju ali isto tako i mišići koji su glavni pokretači izrazito su lagani, a snažni u usporedbi s ostalim sisavcima.

Najvažniji konstruktivski element na kome se i zasniva cijeli diplomski rad je krilo ptice. Krilo i kostur ptice detaljno su obrađeni u ovom poglavlju. Obzirom da su pera među glavnim obilježjima ptica svakako zaslužuju detaljniju analizu vrsta i oblika, ali isto tako i mehaničkih svojstava. Respiratorni i krvožilni sustavi neće se posebno obrađivati u ovom radu obzirom da se obrađuju samo sustavi i konstrukcije koje ptici omogućuju direktan let. Pri razradi ukupne energije potrebne za let uzet će se u obzir i energija potrebna za pogon respiratornog i krvožilnog sustava. Također će se prikazati zanimljivi načini leta ptica uz detaljan opis kretanja krila prilikom mahanja. Obzirom da se u prirodi ptice uglavnom mogu podijeliti na ptice koje većinu leta jedre i one koje većinu leta mašu krilima posebno će se obraditi ova dva potpuno različita načina leta.

### 3.2.1. Krilo ptice

Unutrašnjost krila može se predložiti kao modificirana ruka četveronožaca koja posjeduje sve elemente normalne ruke sisavaca. Vanjski dio krila je ono što definira jedinstven oblik krila koji većinom čine pera.

Krilo se smatra površinom koja stvara uzgonsku silu okomitu na smjer kretanja i tako omogućuje let pticama suprotstavljanjem gravitacijskoj sili i sili otpora kretanja. Općenito sve životinje koje lete imaju jedno ili više krila, a sama veličina, oblik i materijal variraju od vrste do vrste. Obzirom da performanse leta ptice uvelike

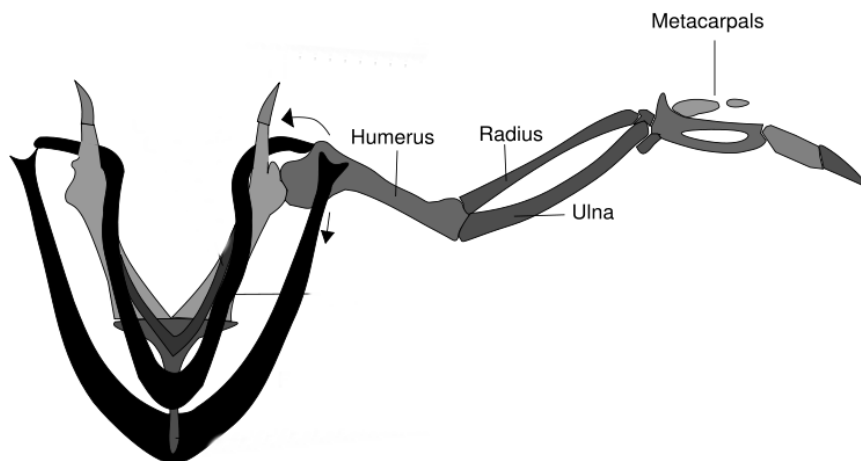
ovisi o površini krila, njenom opterećenju i konfiguraciji, postoje razne vrste krila prilagođene karakterističnom načinu leta koji ovise o prirodnom okruženju u kojem ptica obitava.

#### 3.2.1.1. Unutarnja konstrukcija krila

Glavna karakteristika krila je da moraju biti snažna i lagana. Krila bilo koje životinje moraju proizvoditi silu uzgona koja će se suprotstavljati težini životinje i aerodinamičkom otporu prilikom kretanja prema naprijed. Aerodinamičke sile i momenti koji djeluju na krilo opterećuju cijelu konstrukciju krila koje osim tih sila i momenata mora svladati i sile nastale prilikom leta mahanjem. Potrebna mala masa krila proizlazi iz osnovnog zahtjeva za ostvarenje mogućnosti leta, isto tako prilikom mahanja nastaju inercijske sile koje se povećavaju s masom te tako dodatno opterećuju krilo. Upravo zbog ovih razloga krilo je konstruirano tako da bude iznimno lagano te da mu se masa postepeno smanjuje prema vrhu krila. Masa oba krila kod ptica prema [4] iznosi i do 20% ukupne mase ptice što znači da ptica koja ima masu 10 kg, a raspon krila 3 m ima masu jednog krila približno samo 1 kg.

Slika 3.2.1 prikazuje sve važne dijelove unutarnjeg kostura krila. Mehanizam krila omogućuje ptici da krila može sklopiti uz tijelo, mahati u vertikalnoj ravnini, ali isto tako i da ih može zabacivati prema naprijed i nazad te uvijati oko zgloba u ramenu. Krilo se sastoji od tri zgloba. Glavni zglob se nalazi na spoju krila s tijelom i predstavlja rame krila dok su ostala dva zgloba: zglob lakta i zglob šake. U osnovi mahanje se prvenstveno izvodi preko glavnog zgloba, međutim manje ptice poput kolibrića mahanje izvode preko zgloba lakta zbog toga što imaju izrazito velik kostur šake na kome se nalazi većina pera i nosive površine krila.



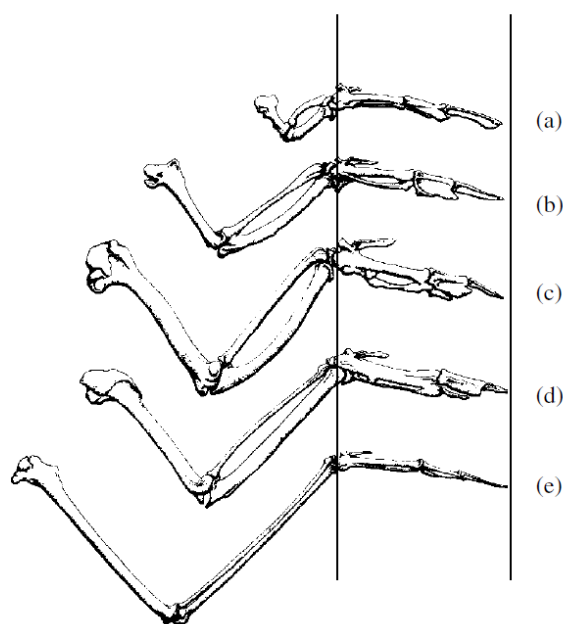


Slika 3.2.1 Kostur krila ptice s vidljivim glavnim mišićem koji se koristi pri mahanju [4]

Kretanje krila prilikom leta mahanjem sastoji se od četiri pokreta: mahanje, zabacivanje, uvijanje i uvlačenje krila. Većina ovih pokreta izvodi se preko glavnog zgloba u ramenu dok ostala dva zgloba u glavnom služe za upravljanje i jednostavnije sklapanje krila uz tijelo. Mahanje krila će biti posebno obrađeno poslije u poglavlju 4.2. Krilo sadrži četiri glavne nosive kosti vidljive na slici 3.2.1 (lat. *humerus*, *radius*, *ulna* i *metacarpals* koji predstavlja cijeli kostur šake) koje se mogu zamisliti kao ramenjače krila na zrakoplovnom krilu. *Humerus* je spojen na zglob ramena koji mu omogućuje slobodu pokreta u sve tri rotacije. Tkivo koje prekriva *humerus*, *radius* i *ulna* se naziva lat. *propagatium* i ono također ima po sebi manja pera koja tvore oplatu napadne ivice krila. Zglob lakta i šake je dvostruki obzirom da se kod svih ptica pokret krila u horizontalnoj ravnini izvodi usklađenim pokretom zgloba lakta i šake. Kostur krila je poseban za svaku vrstu krila pa tako neke ptice koje pri letu više koriste mahanje imaju puno veće mišiće i promjere kostiju dok ptice koje većinu leta jedre poput albatrosa imaju jako duge i tanke kosti koje se vežu na malene mišiće, jer nema potrebe za snažnim pokretima krila.

Slika 3.2.2 prikazuje kostur krila za pet vrsta ptica. Slika 3.2.2 je prikazana na način da je duljina kosti šake jednaka svim vrstama, a ostale kosti prikazuju različitost u samoj konstrukciji. Ako bi se sa slike 3.2.2 usporedio kostur krila albatrosa i krila tetrijeba jasno se vidi da kostur albatrosa nema puno prostora za mišiće između kosti

*radius* i *ulna* dok tetrijeb ima predviđen veliki procijep upravo za smještaj mišića. Razlog ovome je upravo u načinu leta ovih dviju ptice, albatros većinu leta provodi u jedrenju i zato mu nisu potrebni snažni razvijeni mišići za pokretanje donjeg dijela ruke i šake dok kod krila tetrijeba koji većinu leta maše krilima mora postojati razvijena muskulatura koja omogućuje ptici stabilan let. Slika 3.2.2 a) također pokazuje zanimljiv kostur kolibrića koji ima izrazito duge kosti šake, a ostali dio kosti krila mu je znatno kraći.



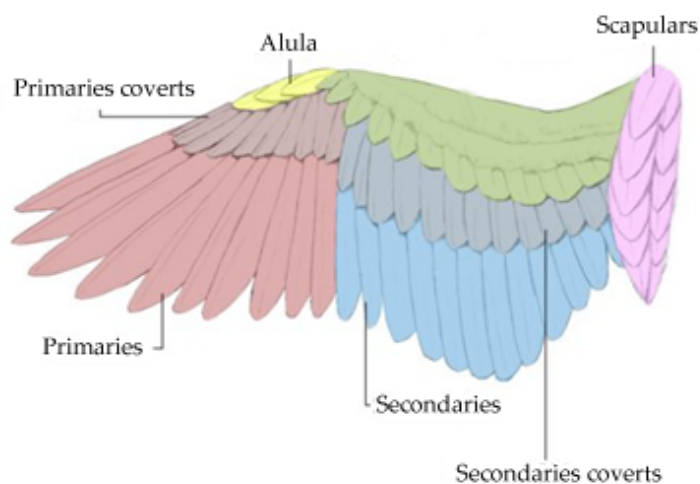
Slika 3.2.2 Oblik kostura raznih krila ptica a) kolibrić, b) golub, c) tetrijeb, d) čvorak, e) albatros [4]

### 3.2.1.2. Vanjska konfiguracija krila

Različitost u veličini i vrsti pera ovisi od vrste do vrste ptice. Pera su implementirana unutar kože krila gdje postoji točan uzorak po kojemu su pera složena. Vanjska konfiguracija krila je prikazana na slici 3.2.3 gdje je krilo podijeljeno po kategorijama pera. Konstrukcija pera će biti posebno obrađena u poglavlju 3.2.4.

Pera na krilu dijele se na kategorije pa tako postoje primarna pera lat. *primaries*, sekundarna pera lat. *secondaries*, pomoćna primarna i sekundarna pera, korijenska pera lat. *scapulars* i pera na prstima šake lat. *alula*. Poznato je kako neke

vrste ptica ne mogu poletjeti ako im se uklone pera *alula* pa su ova pera poznata i pod nazivom eng. *bastard wings*.

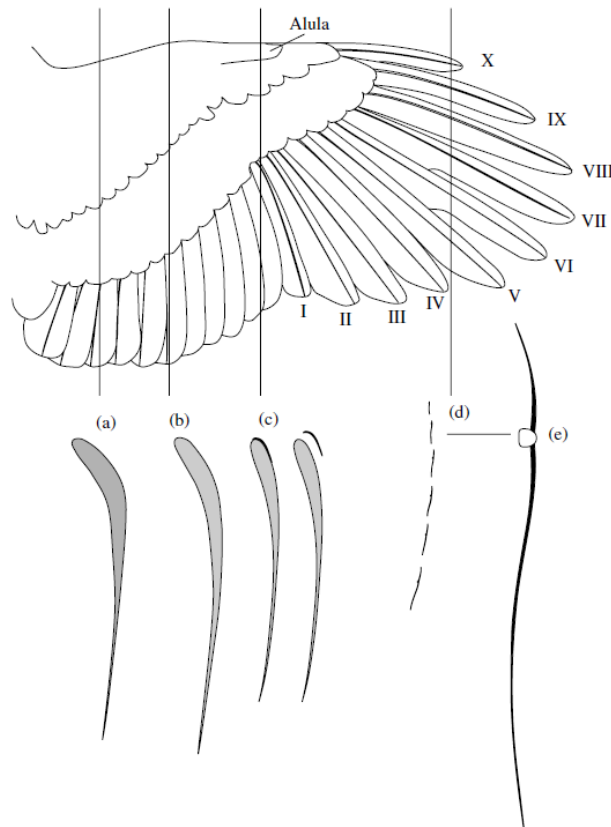


Slika 3.2.3 Kategorije pera na krilu ptice [6]

Konstruktivski gledano krila ptica su otpornija na oštećenja od ostalih životinja poput šišmiša zbog velike količine pojedinačnih elemenata koji mogu funkcionirati neovisno. Sama konstrukcija krila sastoji se od niza zakrivljenih aeroprofila koji smanjuju otpor i povećavaju uzgon poput krila zrakoplova. Prema [5] Reynoldsov broj na vrhovima krila velikih ptica obično iznosi oko  $10^5$ . Zakošenost krila povećava se od korijena prema vrhu krila dok se debljina smanjuje. Ptica ima mogućnosti mijenjati zakošenosti aeroprofila krila aktivno pomoću mišića ili pasivno u letu pomoću aeroelastičnosti samih pera. Tijelo ptice također ima aerodinamičan oblik kako bi smanjilo otpor pri kretanju.

Slika 3.2.4 prikazuje krilo sjevernog jastreba na kojemu se vide skicirani poprečni presjeci krila po dužini. Krilo od korijena ima puno gušća postavljena pera u više redova koja okružuju kostur i mišiće pa tako tvore pravilan aeroprofil koji je vrlo sličan aeroprofilima zrakoplovnih krila. Prema vrhu krila smanjuje se gustoća pera ali isto tako više ne postoji kostur već su pera zakrenuta gotovo okomito na pera u korijenu krila te su spojena na vrhove šake kostura. Na slici 3.2.4 je vidljivo kako se u poprečnom presjeku c) na napadnoj ivici krila nalaze pera *alula* koja imaju svrhu

poput pretkrilaca na zrakoplovnom krilu. Krila velikih ptica poput albatrosa razlikuju se od primjera sa slike 3.2.4 po tome što nemaju procjepe između pera već im krilo ima puno konturu poput zrakoplovnog krila. Postoje razne studije koje proučavaju utjecaj procijepa na vrhovima krila ptica koji su doprinijeli razvoju eng. *wingleta* i smanjenju nastajanja vrtloga zraka na krajevima krila.



Slika 3.2.4 Poprječni presjek krila sjevernog jastreba [4]

Prema konstrukciji krila ptice postoje dvije zasebne potpuno različite konstrukcije krila koje su zanimljive za analizu. To su krilo malih ptica poput kolibrića ili čiope i krilo velikih morskih ptica poput albatrosa.

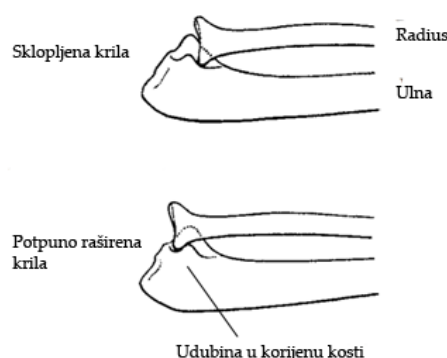
### 3.2.1.3. Konstrukcija krila malih ptica

Krila kolibrića i čiope toliko se razlikuju od standardnog oblika krila da ih je potrebno malo podobnije opisati obzirom da se ona koriste kao temelj za mikro bespilotne letjelice. Glavna odlika ovog krila je izrazito duga šaka dok je ostali kostur krila puno manji u razmjeru s drugim pticama. Kost *humerus* i *ulna* tvore fiksni oblik

krila u obliku slova V koji se ne može mijenjati u letu zbog toga što mišići popunjavaju prazninu između ove dvije kosti. Glavni razlog zašto kolibrić ima ovako specifičan oblik krila je zbog toga što mu je potrebna iznimno velika frekvencija mahanja krila kako bi uspio održati karakterističan način leta za tu vrstu. Veličine ovih ptica iznose od 5 do 13 cm, a frekvencije mahanja do 90 puta u sekundi. Mišići koji ovakvim pticama omogućavaju mahanje iznose i do 27% ukupne mase ptice.

#### 3.2.1.4. Konstrukcija krila velikih ptica poput albatrosa

Velike ptice se uglavnom nalaze u blizini morskih područja te se u letu oslanjaju na svoja vitka i duga krila koja im omogućavaju potreban uzgon. Jedrenje pri velikim brzinama je njihova specijalnost. Najpoznatija od svih velikih ptica je albatros koji je poznat po svojoj sposobnosti uklještenja krila u ramenom zglobu kako bi si osigurao jedrenje s potpuno raširenim krilima, a da pri tome nema potrebe za korištenjem mišićne snage. Ovaj mehanizam zaključavanja krila pri potpunom rasponu je prikazan na slici 3.2.5. Mogućnost zaključavanja krila u potpuno ispruženi položaj omogućuje albatrosu da jedri dnevno bez potrebe za ikakvim pokretima krila osim za upravljanje. Poznato je kako albatrosi u letu čak mogu i spavati, a da pri tome održavaju ravnotežan let. U poglavlju 4.1.1. spomenut će se jedinstveni način leta kojim se koriste velike morske ptice poput albatrosa. Ako se usporedi kostur krila albatrosa slikom 3.2.2 s kosturom krila kolibrića lako se uočava kako albatros ima kratku šaku u usporedbi s ostatkom ruke zbog toga što mu primarni način leta nije mahanje već jedrenje. S druge strane izrazito dug kostur šake kolibriću omogućava velike brzine mahanja. Kosti krila su tanke i šuplje, a mišići su maleni u usporedbi s drugim vrstama ptica. Zbog ovoga albatrosu treba duži zalet kako bi uspio ostvariti dovoljnu silu uzgona na krilima obzirom da mu krila nisu predviđena za visoke frekvencije mahanja.



Slika 3.2.5 Mehanizam uklještenja krila albatrosa [4]

### 3.2.1.5. Dinamičke karakteristike krila

Oblici krila se razlikuju za svaku vrstu ptice ali promjene oblika koje se događaju prilikom mahanja su puno dramatičnije i kompliciranije za analizu. Prije polijetanja krila su uredno složena uz tijelo ptice. Pri početku leta ptica širi krila koja se lagano savijaju prilikom mahanja prema gore, a potpuno se izdužuju pri početku svakog pokreta prema dolje. Osnovni pokreti krila prilikom mahanja su mahanje u vertikalnoj ravnini, zabacivanje u horizontalnoj ravnini i rotacije u horizontalnoj ravnini oko zgloba u ramenu ptice. Korijen kosti *humerus* nije kuglastog završetka već ima oblik jajeta koji svojom konstrukcijom služi kao graničnik za sva kretanja oko zgloba. Kretanje krila također su ograničena raznim ligamentima i mišićima koji su različiti za svaku vrstu ptice. Iako su dimenzije kostura različite za svaku vrstu ptice, mehanizam mahanja je jednak kod svih njih.

Usporedbom krila ptice s krilima drugih životinja poput šišmiša, vjeverica i insekata vidi se kako je glavna razlika u tome što ptica posjeduje krila s kosturom na koji se vežu pera koja se mogu preklapati jedna preko drugoga, dok sve ostale životinje imaju krilo poput membrane koje je ojačano kosturom.

#### 3.2.1.5.1. Uređaji za povećanja uzgona

Pri malim brzinama potrebno je osigurati dovoljnu silu uzgona za stabilan let. Ptice imaju nekoliko načina kako ostvaruju dodatan uzgon na krilima. Osnovni način

dobivanja uzgona je širenje krila u potpuno ispružen položaj uz dodatno uvijanje krila čime se povećava napadni kut. Osim ovog načina postizanja dodatnog uzgona postoje "pomoćni uređaji" koji ptici omogućuju ostvarivanje uzgona, a da pri tome ne riskiraju ulazak u područje gubitka uzgona.

Ptice koje većinu vremena jedre imaju povremeno potrebu za visokom upravljivosti prilikom slijetanja na kompliciran teren ili pri naletu jakih vjetrova u nepovoljnim atmosferskim uvjetima. Glavna razlika konstrukcije krila između velikih kopnenih i morskih ptica je upravo u procijepima koje kopnene ptice imaju na krajevima krila dok morske ptice imaju punu zakošenu konturu krila. Razlog ovome je što kopnene ptice imaju znatno veće zahtjeve za upravljivosti prilikom lova plijena u zraku ili na zemlji, dok morske ptice žive uglavnom na područjima na kojima nema plijena pa su im se krila razvila za optimalno jedrenje.

#### Pera na napadnoj ivici krila

Pri niskim brzinama potrebno je razbiti odvajanje laminarnog toka strujanja oko krila. Ovo se postiže upotrebom generatora turbulencija koji su obično mala pera postavljena okomito na smjer strujanja zraka, a nalaze se na napadnoj ivici krila. Kroeger je 1972. godine prilikom ispitivanja strujanja zraka oko krila sove u zračnom tunelu otkrio kako se pri niskim brzinama stvara zaseban vrtlog zraka oko pera *alula* koji se proteže do kraja prvog primarnog pera i time sprječava odvajanje strujanje na drugom dijelu krila. Ovaj vrtlog zraka je također poznat po tome što stišava buku nastalu strujanjem zraka oko krila tako da uništava laminarne balone zraka koji nastaju prilikom odvajanja laminarnog strujanja zraka.

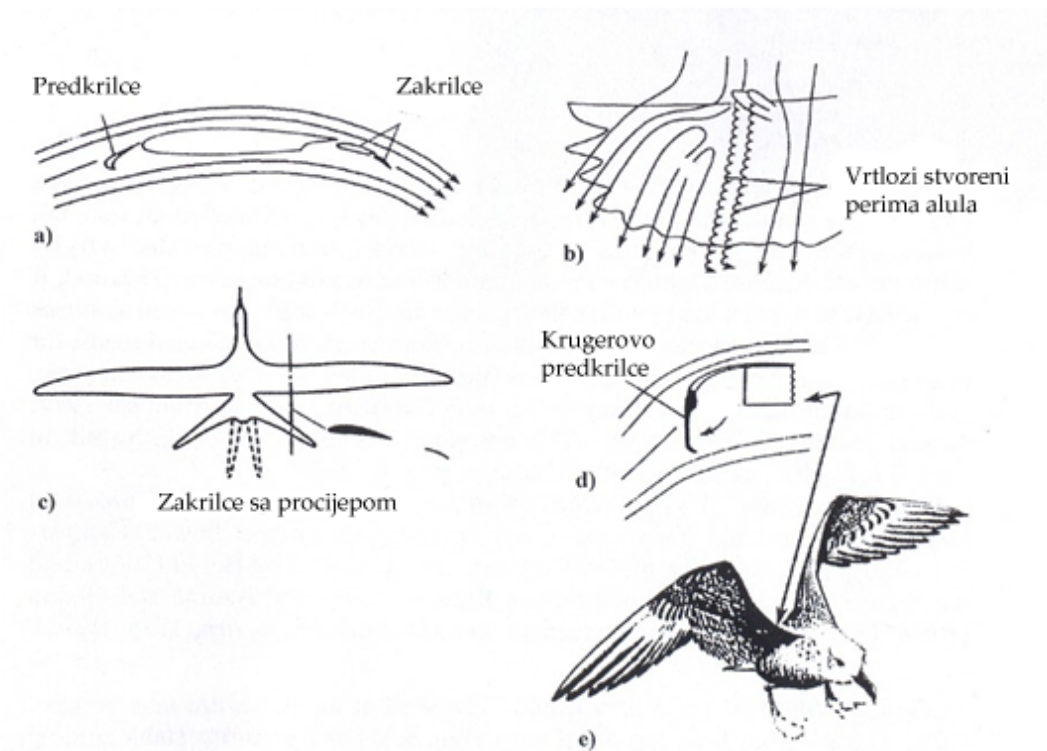
#### *Bastard wing*

Kako je spomenuto u poglavlju konstrukcije krila *bastard wing* se nazivaju pera koja se nalaze na napadnoj ivici krila, a predstavljaju palac kostura šake koji na sebi ima dva do tri pera zvana *alula*. Smatra se kako je položaj ovih pera na mjestu gdje se ostvaruju najveći koeficijenti uzgona odnosno na mjestu gdje se mogu očekivati prva

odvajanja laminarnog strujanja. Ako se usporedi sa zrakoplovnim krilom, *alula* predstavlja konvencionalno pretkrilce koje sprječava odvajanja struje zraka tako da propušta zrak sa donje površine na gornju, ali isto tako i da služi kao generator turbulencija na krilu.

### Zakrilca

Sustav sličan zakrilcima na zrakoplovu također se koristi kako bi se povećao uzgon na krilu prilikom malih brzina. Zakrivljenost profila krila se povećava znatno kako bi se povećao protok zraka kroz procijepe na krilu, a ptica širi rep koji se nadovezuje na krilo i stvara dodatnu noseću površinu sličnu zakrilcu zrakoplova. Pojedine ptice poput jastreba imaju mogućnost dodatnog pomicanja napadnog ruba krila pa time tvore tzv. Krugerovo pretkrilce. Slika 3.2.6 prikazuje tipove pomoćnih uređaja kojima ptice ostvaruju dodatni uzgon.



Slika 3.2.6 Primjeri pomoćnih uređaja za ostvarivanje uzgona na krilu ptice. [5]



### 3.2.2. Tijelo i kostur ptice



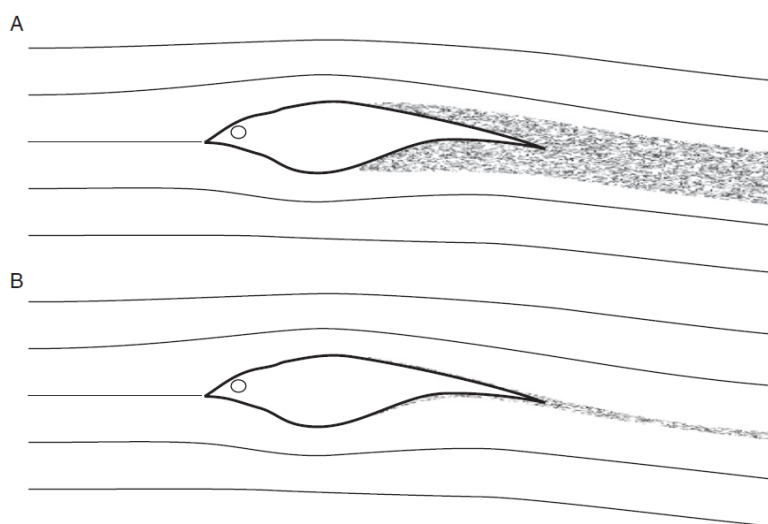
Slika 3.2.7 Kostur ptice [7]

Pri letu ptica postavlja glavu, tijelo i rep u aerodinamičan položaj koji na prednjem dijelu ima zakrivljeni dio koji tvori glava, a prema kraju tijela oštri uski rep. Obzirom da neke ptice imaju izrazito duge vratove zbog potreba okruženja u kojima žive, one imaju mogućnost upravljanja centrom masa pomicanjem vrata pri letu. Poznato je da ptice poput roda i čaplji u letu potpuno izdužuju svoj vrat kako bi teška glava bila što više pomaknuta prema naprijed i tako pomicala centar masa naprijed. Za razliku od njih pelikani su poznati po tome da u letu skupljaju vrat umjesto da ga izduže. Ptice koje imaju sposobnost lebdjenja poput kolibrića koriste mogućnost skupljanja vrata kako bi im glava bila uvijek u stabilnom položaju u odnosu na zemlju. Noge su glavni element koji omogućuje pticama polijetanje i slijetanje. Noge im služe za odbacivanje u zrak ili čak za zatrčavanje pri polijetanju, ali isto tako da apsorbiraju velike sile prilikom grubog slijetanja. Ptice također koriste noge za pomicanje centra masa u letu te time dodatno poboljšavaju performanse leta. Mnoge ptice koriste noge za prijenos plijena ili čak kao ubojito sredstvo u silovitim napadima. Prilikom leta noge se smještaju uz tijelo te ih pera u potpunosti prekrivaju kako ne bi kvarila aerodinamičnost ptice. S druge strane neke ptice guraju noge potpuno iza uz rep poput galebova koji imaju plivaće kožice između prstiju koje im u letu služe kao dodatne nosive površine ali isto tako i zračne kočnice prilikom slijetanja.

Prosječna srednja masa kostura ptice iznosi oko 6% ukupne mase dok kod ostalih sisavaca ta brojka iznosi 10% što znači da ptice imaju olakšani kostur koji je optimiziran za let. Primjer nekih ptica koje žive uz morske obale i imaju raspon krila od 2 m, a masu cijelog kostura samo 0.11 kg što je čak lakše od pera na krilima ptice. Kirkpatrick (1990) daje statističke formule za masu krila.

$$m_w = 9.74 \times 10^{-2} m^{1.1} \quad 3.2.3$$

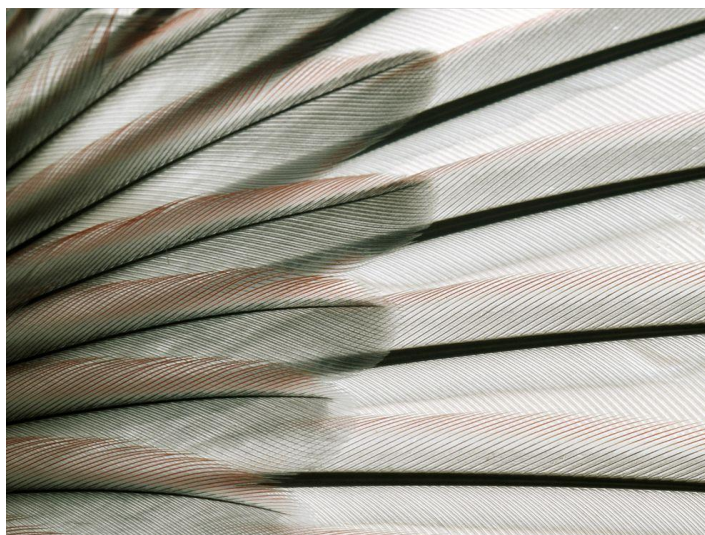
Slika 3.2.8 prikazuje zanimljivost koja je otkrivena u zračnom tunelu prilikom proučavanja vrtloga zraka nastalog iza tijela ptice. Slika 3.2.8a) prikazuje kako izgleda strujanje zraka oko mrtve ptice u zračnom tunelu dok slika b) prikazuje strujanje oko te iste ptice, ali dok je živa. Jasno je vidljivo povećano vrtloženje zraka koja se stvara iza mrtve ptice koje povećava otpor strujanju ptici i općenito smanjuje aerodinamična svojstva ptice. Nakon ovog ispitivanja došlo se do zaključka kako ptice ustvari cijelo vrijeme pokreću pera na tijelu i time proizvode sitne procijepe kako bi zrak mogao prostrujati s gornje površine na donje i time približiti granični sloj strujanja što bliže tijelu.



Slika 3.2.8 Grafički prikaz opstrujavanja ptice u zračnom tunelu a) mrtva ptica, b) živa ptica [8]

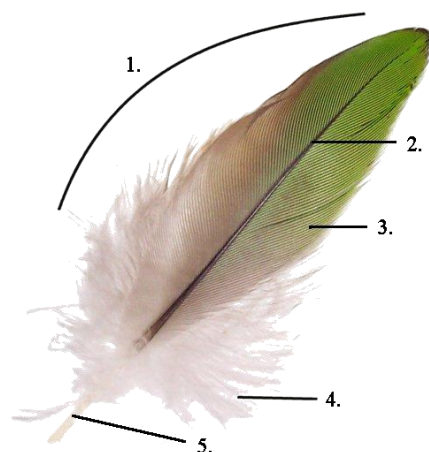
### 3.2.3. Opis i konstrukcija pera

Pera su glavna obilježja ptice koja postoje u raznim oblicima i veličina. U ovom poglavlju posebno bit će obrađena samo pera koja pticama omogućavaju let dok se ostala pera koja uglavnom služe kao izolacija neće spominjati. Sama konstrukcija pera izrazito je kompleksna, a posebno je zanimljiva kada se prikazuje u kombinaciji s aerodinamičkim i mehaničkim svojstvima pera. U osnovi pera se sastoje od nosive grede eng. *shaft* i dlačica koje čine oplatu krila slično kao kod zrakoplovnog krila. Iako izgledaju krhko pera ustvari imaju čvrstu konstrukciju gdje su dlačice međusobno povezane kukicama koje se pri bilo kakvom oštećenju samo razdvajaju i sprječavaju dodatno oštećenje cijelog pera. U prirodi ptice konstantno održavaju svoja pera upravo čisteći nečistoće i kako bi se dlačice mogle ponovno povezati.



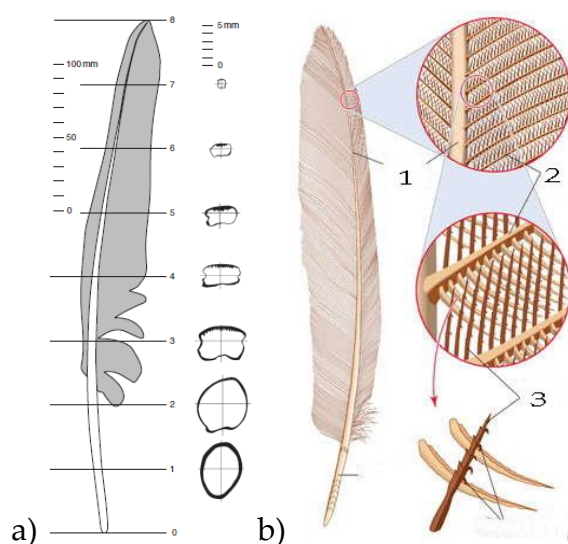
Slika 3.2.9 Pera [9]

Pera se mogu smatrati mrtvim tkivom koji se koristi za izvođenje kompleksnih funkcija ostvarivanja zrakonepropusnog aeroprofila. Spoj koji spaja pera sa živim tkivom se sastoji od kože, živaca i mišića. Pero je građeno od proteina zvanog keratin. Sva pera imaju središnju nosivu gredu zvanu lat. *rachis* koja s obje strane ima male dlačice lat. *barbules* koje tvore oblik samog pera. Slika 3.2.10. prikazuje oblik pera i konstrukciju pera sa svim važnim elementima.



Slika 3.2.10 Prikaz pera sa svim važnim gradivim elementima. 1. Vanjska napadna ivica (lat. vane), 2. Nosiva greda pera (lat. rachis), 3. Glavne dlačice pera (lat. barbules), 4. Korijske nerazvijene dlačice pera, 5. Korijske dlačice koje se spajaju na kostur ptice [10]

Korijen pera odnosno nosiva greda pera koja je pričvršćena u tkivo ptice se naziva lat. *calamus*. *Calamus* je građen poput šuplje cjevčice koja se nastavlja na *rachis* kojemu je šuplja sredina ispunjena spužvastim materijalom također građenim od keratina. Prema slici 3.2.11a) vidi se da *calamus* ima kružni poprečni presjek dok *rachis* ima zaobljeni kvadratni poprečni presjek. *Calamus* kod nekih vrsta pera zna biti izuzetno dug i do 30% ukupne duljine pera.



Slika 3.2.11 a) Prikaz promjene poprečnog presjeka pera [8], b) Prikaz kukica kojima su dlačice pera međusobno povezane gdje su na slici pod 1. rachis, 2. Barbules 3. kukice koje povezuju dlačice pera [11]

Dlačice pera nastaju na dijelu pera koji se zove lat. *superior umbilicus* te su u početku malene i nerazvijene pa formiraju nepravilne oblike. Iako djeluju kao niz paralelnih dlačica koje se slobodno i neovisno mogu gibati one su u stvari međusobno povezane malim kukama pa tako tvore punu konturu koja je dovoljno čvrsta da se suprotstavi strujanju zraka. Pero krila se obično dijeli na napadni dio pera koji ima kraće dlačice i izlazni dio pera koji je karakterističan po duljim dlačicama pera. Ovakvom postavkom pera imaju oblik aeroprofila pa se u nekim slučajevima vanjska pera postavljaju u potpuno okomit položaj na let i tako tvore napadnu ivicu krila. Uži dio koji se nalazi na napadnoj ivici pera je uvijek čvršći od izlaznog dijela pera zbog toga što su mu dlačice postavljene gušće. Ako bi se pero promatralo kao krilo, njegova površina ne bi bila glatka i čista kako se čini na prvi pogled. Dlačice sa svojim kukama kojima se povezuju tvore male mikroskopske izbočine za koje se pokazalo da ujedno služe kao sredstva za smanjivanje otpora strujanju zraku. Slika 3.2.11b) prikazuje konstrukciju kukica kojima se dlačice međusobno povezuju te tako tvore zatvorenu zrakonepropusnu površinu.

### 3.2.3.1. Mehanička svojstva pera

Glavne karakteristike pera su mala masa, visoka čvrstoća i zračna nepropusnost. Mala masa je prvenstveno potrebna zbog toga što se krilo, a time i pero prilikom mahanja izlaže velikim dinamičkim opterećenjima koje znatno ovise o težini krila i pera. Naravno da je masa pera važna i kao udio u ukupnoj masi ptice koje krila moraju poduprijeti silom uzgona. Čvrstoća pera se prvenstveno odnosi na čvrstoću središnje grede pera *rachis-a*, obzirom da je to nosivi dio pera koji prenosi na kostur sve sile i momente koji djeluju na peru. Dlačice na peru predstavljaju pokrov krila koji je nepropustan za zrak i može se gledati na njega slično kao na oplatu zrakoplova. Dlačice pera su izuzetno osjetljive konstrukcije koja se s vremenom troše, ali ih isto tako i treba konstanto održavati što svaka ptica čini pomoću kljuna ili noktiju na prstima nogu. Naime ako se dlačice zalijepe ili se savinu u krivom smjeru ptica osjeti te nepravilnosti u letu te ih instinktivno pokušava popraviti. Kroz sve

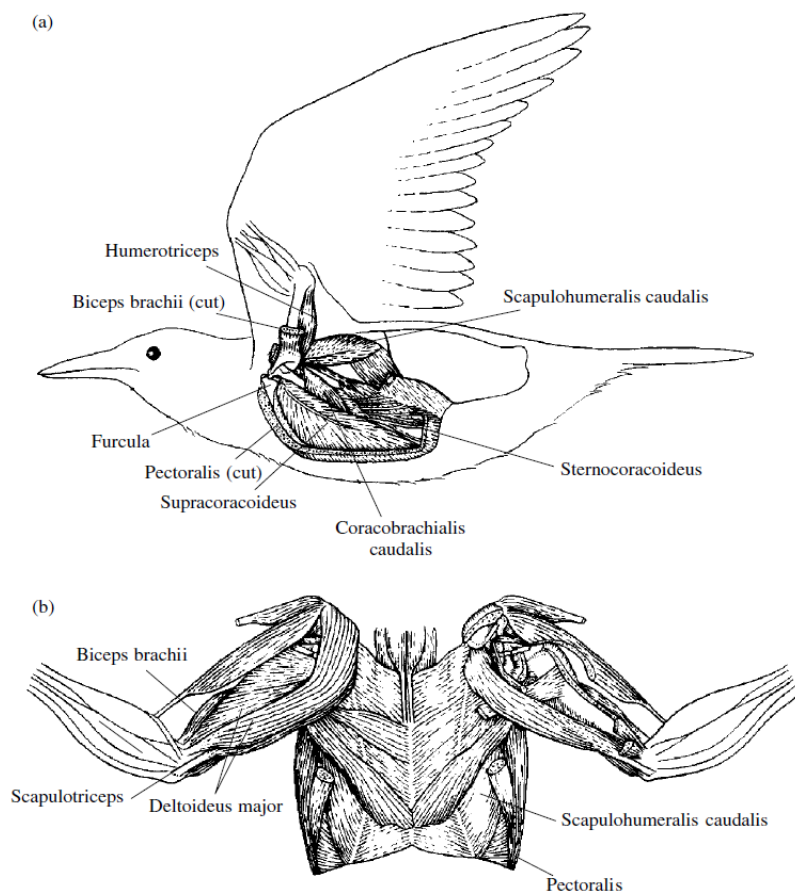
dostupne studije može se zaključiti kako je konstrukcija pera izuzetno komplicirana za analizu pa tako ne postoji mnogo dostupnih podataka o mehaničkim svojstvima pera i krila.

Pera su izrađena od keratina koji ima gustoću  $1.15 \text{ g/cm}^3$ . Keratin pripada porodici kompleksnih proteina koji se mogu naći kod svih sisavaca. Keratin od pera ptice je lakši od keratina kljuna ili noktiju. Melanin je crni polimerni pigment koji je poznat po tome što perima daje tamne boje, ali isto tako im poboljšava čvrstoću. Postoji više studija koje prikazuju usporedbu albino pera s crnim perima koja imaju u sebi pigmente melanina. Bonser je 1995. godine u svojoj studiji pokazao kako su pera tetrijeba koja su sadržavala melanin imala i do 40% veću čvrstoću nego ona koja su bila samo od keratina. Mjerenje čvrstoće pera izveo je Bonser 1995. godine [12] godine, koji je uzeo male dijelove keratina iz korijena pera. Test se izvodio na način da se pomoću stroja nalik grickalici za nokte mjerila sila potrebna da se potpuno presiječe komad pera. Mjerenja su pokazala da je sila rasla linearno sve dok nije došlo do puknuća pera. Rezultati su pokazali kako je sila potrebna da se slomi osovina pera u uzdužnom smjeru  $3\text{--}8 \text{ kJ/m}^2$ , a u poprečnom smjeru  $11\text{--}18 \text{ kJ/m}^2$ . Nisu poznati drugi podaci mjerenja čvrstoće pera. Elastičnost je također važno svojstvo materijala. Bonser i Purslow su 1995. godine [12] testirali elastičnost pera na više vrsta ptica. Rezultati su pokazali kao je čvrstoća pera opadala prema vrhu pera kako se smanjivao poprečni presjek osovine pera. Mjerenjima su utvrdili prosječni modul elastičnosti za materijal keratin u perima ptica. Srednji modul elastičnosti iznosi  $2.5 \text{ GPa}$ , a prema mjerenjima varira od  $1.8\text{--}2.8 \text{ GPa}$ . Zanimljivo je da su mjerenja otkrila kako se modul elastičnosti mijenja od korijena prema vrhu pera i to tako da se povećava prema vrhu. U slučaju labudovog pera rezultati modula elastičnosti u korijenu pera su iznosili  $2 \text{ GPa}$  dok su pri vrhu iznosili  $4 \text{ GPa}$ . Zbog ovog slučaja pero ne gubi na mehaničkim svojstvima dramatično kako bi to bilo zbog same promjene poprečnog presjeka. Razlog je u strukturi keratina u gornjem dijelu pera koja je puno kompleksnija i gušća od keratina u donjem dijelu pera.



### 3.2.4. Muskulatura

Krilo ptice sadrži 45 različitih mišića od kojih je 11 podijeljeno u dva ili tri dijela. Najvažniji mišići potrebni za let su dva para mišića koja se nalaze između gornjeg dijela ruke i trupa ptice. Veći par mišića se naziva lat. *pectoralis major*, koji je kod nekih vrsta ptica podijeljen na dio s brzo pokretnim i sporo pokretnim vlaknima. On pruža snažan pokret prema dolje koji je potreban pri mahanju krila. Pokret krila prema gore zahtijeva puno manje snage pa je zato drugi par mišića lat. *pectoralis minor* koji služi samo za pokret krila prema gore manji i slabiji od glavnog mišića. Mišići prilikom kontrakcije mogu razviti maksimalni pritisak od 200-400 kN/m<sup>2</sup>, a maksimalna snaga se razvija kada su stisnuti na jednu trećinu svoje duljine kretanja. Obzirom da mišići proizvode snagu ovisno o vlastitom poprečnom presjeku jasno je da veći odnosno širi mišići pružaju veću raspoloživu snagu.



Slika 3.2.12 Prikaz mišića ptice ostvaren pomoću elektromagnetskog zračenja [4]

Slika 3.2.12. prikazuje složenu konstrukciju mišića kod europskog čvorka. Prikaz je izveden pomoću elektromagnetskog zračenja dok je ptica letjela u zračnom tunelu kako bi se što bolje uhvatila pozicija mišića raznim pokretima krila. Na slici su izražene samo neke porodice mišića zbog toga što su pojedini mišići sitni, a i njihova kompleksnost još uvijek predstavlja problem kod razumijevanja što pojedini mišići izvode u zadanom trenutku.

Ptice također posjeduju površinske mišiće odnosno mišiće koji se nalaze na mjestima gdje pero ulazi u kožu te služe za kontrolu svakog pera pojedinačno što pticama omogućava jedinstvena aerodinamična svojstva.

Konstruktivski gledano ptice koje u letu koriste mahanje imaju daleko veću masu mišića u odnosu na masu tijela za razliku od ptica koje jedre. Jasno je da je mišićima potrebno gorivo koje je ograničeno pa tako sve ptice selice koje se većinom služe mahanjem moraju povremeno odmarati i hraniti organizam.

Masne naslage ili salo najbolji su biološki izbor za gorivo prvenstveno zbog toga što ne sadrže vodu koja povećava masu. Tablica 3.2.1 prikazuje energetske gustoće tri tipa bioloških goriva koje hrane organizam svih živih bića.

**Tablica 3.2.1 Energetska gustoća bioloških goriva [4]**

Gorivo	Postotak vode	Energetska gustoća J/kg
Salo	0	$3.9 \times 10^7$
Glikogen	73	$4.6 \times 10^6$
Protein	69	$5.7 \times 10^6$



## 4. Načini leta ptica

---

Let ptica se može generalno klasificirati u dvije kategorije, jedrenje i mahanje. U ovom poglavlju posebno će se obraditi načini leta ptica koji prvenstveno ovise o konfiguraciji tijela i obliku krila ptice. Postoje jasne razlike između kopnenih i morskih ptica u konstrukciji i načinu leta. Svaka ptica ima mogućnost promijeniti oblik krila te time mijenjati ovisnost stabilnosti i upravljivosti leta.

Početak svakog leta ptice započinje polijetanjem koje prati prolazak kroz zrak na određenoj udaljenosti i završava sa slijetanjem. Analiziranjem više letova u kontroliranim uvjetima može se uočiti izbor strategije leta ptice. Kao pilot ptica mora donositi odluke koje se tiču : visine, brzine, ubrzanja, usporavanja, korištenja krila tokom mahanja ili jedrenja, te korištenja repa i ostalih dijelova trupa. Ako bi se načini leta ptice proučavali s aerodinamičnog pogleda uvidjeli bi kako su ptice izvrsni letači koji mijenjaju stabilnost i upravljivost u svakom trenu ali isto tako koriste maksimalna ograničenja svoje konstrukcije prilikom naglih manevara koji se obično izvode ako im je ugrožen život ili ako se upuštaju u lov na plijen.

Kategorije leta ptica se mogu u osnovi podijeliti na ove kategorije:

- Jedrenje
- Mahanje
- Krstarenje

- Isprekidani let
- Lebdjenje
- Polijetanje i slijetanje

## 4.1. Jedrenje

U ovom poglavlju prikazat će se stvorenja koja većinu leta u zraku jedre. Ovo su u glavnom velike ptice na kopnenim i morskim područjima ali postoje i neke druge životinje poput letećih vjeverica, letećih riba i letećih zmija koje također koriste slične principe jedrenja.

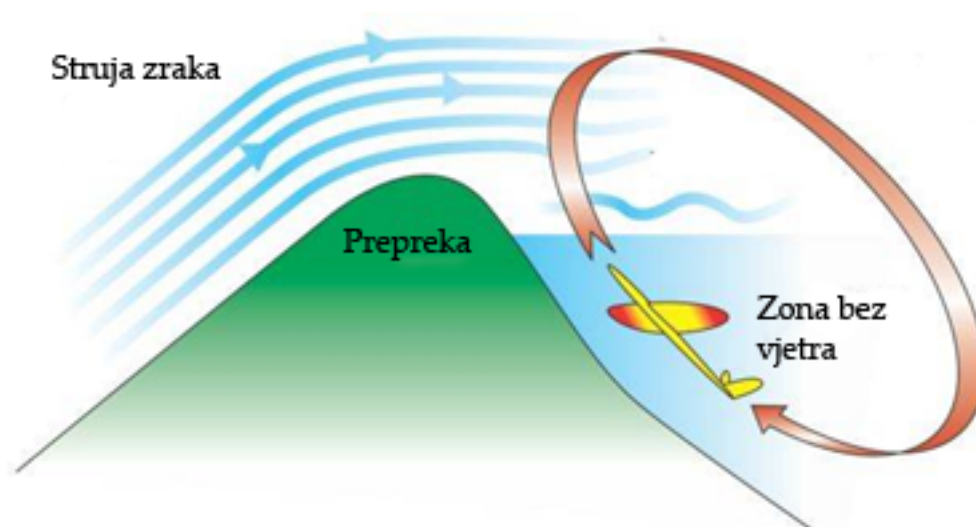
Jedrenje se izvodi tako da ptica u letu ne koristi krila za mahanje nego samo za ostvarivanje potrebne sile uzgona koju stvara struja zraka. Ptica upravlja smjerom kretanja malim pokretima šake krila. Pri jedrenju glavne sile koje djeluju na tijelo ptice su sila gravitacije i aerodinamičke sile i momenti. U ovom načinu leta krila su potpuno ispružena kako bi ostvarila maksimalne performanse uz minimalnu potrošnju energije. Obzirom da su potrebne velike optimizacije same konstrukcije ptice kako bi se svladala težina ptice, krila ptica su obično velikog raspona i velike vitkosti. Neke od najpoznatijih ptica koje jedre su: albatrosi, pelikani, rode, čaplje, labudovi i flamingosi.

### 4.1.1. Dinamičko jedrenje

Dinamičko jedrenje je izrazito zanimljiva tehnika leta koju koriste velike morske ptice, a najučinkovitiji letač od svih je albatros. Rayleigh je još 1883. godine opisao dinamičko jedrenje gdje navodi kako se može zaključiti da ako ptica u horizontalnom letu ne koristi krila postoje tri fizičke mogućnosti koje joj omogućavaju ravnotežan horizontalan let. Prvo, let ptice nije horizontalan odnosno gubitak horizontalne brzine nadomješta laganim poniranjem. Drugo, vjetar nije horizontalan pa pomaže ptici da održi horizontalan let. Treće, vjetar koji struji nije jednolik u vertikalnoj ravnini. Upravo ovaj treći slučaj predstavlja dinamičko jedrenje. U praksi dinamičko

jedrenje ostvaruje se tako da ptica leti uz površinu koja se nalazi između prepreka iznad kojih puše vjetar. U trenutku približavanja prepreci ptica se propinje i ulazi u struju zraka koja se nalazi iznad prepreke koja joj pri tome daje potrebnu energiju za ostvarivanje leta. Nakon toga ptica se zaokreće niz struju vjetra i opet ulazi u prostor između prepreka gdje ponavlja cijeli proces. Cijeli ovaj proces ptica obavlja bez mahanja krila što joj omogućava neprekidan let. Prepreke su obično visoki valovi na otvorenom oceanu koji su prosječno visoki nekoliko metara, ali isto tako i razna brda i kotline na obali.

Tehniku dinamičkog jedrenja u današnje vrijeme najviše koriste modelari ultra lakih bespilotnih letjelica pa je tako postavljen i brzinski rekord od 630 km/h koji je postavila letjelica bez motora koja je samo uz pomoć tehnike dinamičkog jedrenja ostvarila ovaj rekord. Slika 4.1.1 prikazuje osnovni princip dinamičkog jedrenja.



Slika 4.1.1 Princip dinamičkog jedrenja [13]

## 4.2. Mahanje

Insekti i ptice koriste isključivo mahanje za pogonjen let. Tijekom leta, mahanje je jedini način kojim mogu nadvladati silu vlastite težine i kretati se unaprijed usprkos

sili aerodinamičnog otpora. Drugi načini pokretanja, kao npr. plivanje riba i sisavaca nisu prikladni za letenje jer ne mogu stvarati dovoljnu silu uzgona u blizini težišta te održavati ravnotežni let bez gubitka kontrole.

Propulzija se postiže zbrojem eng. *heaving* brzine u smjeru normale i napredujuće eng. *forward* brzine (paralelene ravnini krila). Ovakvo kretanje je posljedica mahanja odnosno gibanja krila u vertikalnoj ravnini gore-dolje. Načini i frekvencija mahanja se razlikuju od vrste do vrste i ovise o veličini i obliku tijela te načinu leta. Međutim, frekvencija i načini leta uvijek su odabrani za optimalnu potrošnju energije pri određenom načinu leta, osim u posebnim slučajevima nužde.

Razlika u mahanju između ptica i insekata može se vidjeti u načinu na koji koriste sile uzgona i otpora. Ptice se oslanjaju u potpunosti na uzgonsku silu jer je Reynoldsov broj krila dovoljno velik, dok insekti koriste i otpor koji radi malog Reynoldsovog broja, visoke frekvencije mahanja krila i male vitkosti krila uključuje i nestacionarne efekte.

Mehanika prirodno pogonjenog leta je oduvijek bila predmet istraživanja mnogih znanstvenika poput Leonarda da Vincia, Sir Georga Cayleya i Otta Lilienthala. Poznato je da veće životinje lete uglavnom tako da jedre i sporo mašu krilima, dok manje ptice lete mašući krilima pri viskom frekvencijama. Stoga raspon frekvencija i Reynoldsovih brojeva varira kao što prikazuje tablica 4.2.1.

**Tablica 4.2.1 Reynoldsovi brojevi i frekvencije mahanja za razne životinje [5]**

Vrsta	Masa [kg]	Frekvencija mahanja [Hz]	Reynoldsov broj
Osa	$2.5 \times 10^{-8}$	370	$2 \times 10^1$
Voćna muha	$2 \times 10^{-6}$	240	$2 \times 10^2$
Bumbar	$8.8 \times 10^{-4}$	156	$4 \times 10^3$
Kolibrić	$2.2 \times 10^{-2}$	15	$1.5 \times 10^4$
Vrabac	$3 \times 10^{-2}$	13	$1 \times 10^5$
Golub	$3.5 \times 10^{-1}$	6	$2 \times 10^5$
Roda	3.5	2	$4 \times 10^5$

Potrebna snaga za mahanje može se analizirati jednostavno proširenjem analize jedrenja, bez detaljnog razmatranja mehanizma pokretanja krila. Pomoću jednadžbe količine gibanja odrede se aerodinamičke sile i potrebna snaga jer je metoda jednostavna i ne zahtijeva poznavanje raspodjele tlaka na krilima. Zatim, iz bilance potrebne i dostupne snage (koja se dobiva iz mišića) mogu se procijeniti performanse leta. Kao što se masa, frekvencija mahanja i Reynoldsov broj razlikuju od vrste do vrste, tako varira potrebna i raspoloživa snaga.

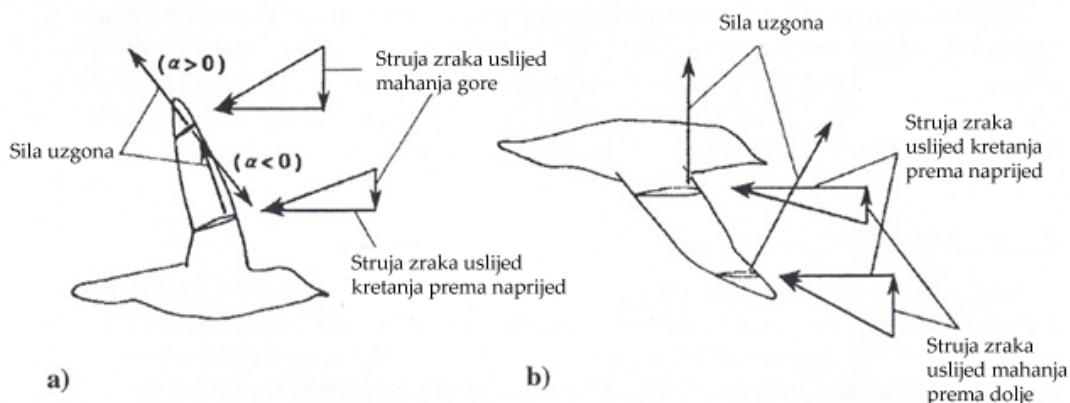
Snaga koju mišići mogu razvijati obično ovisi o vrsti i masi mišića, a prosječno iznosi od 50-260 W/kg. Poznato je kako neke male ptice koje imaju krila razvijena za jedrenje mogu koristiti mahanje pri naglim okretima ili u slučaju nužde, međutim tada su jako zakinute obzirom da su im mišići maleni, pa se raspoloživa snaga naglo potroši i ptice moraju odmoriti organizam kako bi nastavile let. Važna stavka kod raspoložive snage ptice je ta da se ona ne koristi samo za pogon krila već se mora uzeti u obzir potrebna snaga za održavanje svih životnih funkcija ptice od kojih su najvažniji pogon krvožilnog i respiratornog sustava.

U napredujućem letu, zrak mora biti ubrzavan tako da generira potisak koji može kompenzirati silu otpora te stvoriti silu uzgona koja se suprotstavlja težini ptice ili životinje. Pri aerodinamičnoj analizi gibanja ptice koriste se poznati teoremi i zaključci iz aerodinamike zrakoplova te se oni neće posebno objašnjavati u ovome radu.

Mehanički gledano mahanje krila ptice se sastoji od četiri fundamentalna pokreta. Prvi pokret je mahanje krila u okomitoj ravnini, drugi je zabacivanje krila u vodoravnoj ravnini, treći je uvijanje krila oko uzdužne ravnine krila i četvrti je savijanje odnosno smanjivanje raspona krila.

Slika 4.2.1. prikazuje djelovanje aerodinamičnih sila prilikom mahanja krila. Prvo je prikazan položaj krila u zamahu prema gore odnosno u takozvanom razdoblju oporavka kada ptica troši puno manje snage. Na slici je vidljivo kako sila uzgona ima smjer zabačen prema nazad dok za negativne napadne kutove smjer sile

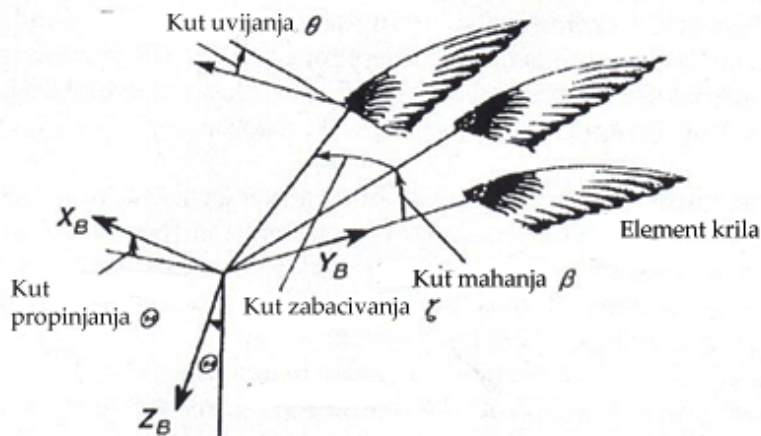
uzgona se potpuno mijenja pa postaje negativan. Prilikom pokreta krila prema dolje (slika 4.2.2b) vidljivo je kako se sila uzgona naginje prema naprijed na vanjskim krajevima krila dok je u korijenu okomita na smjer kretanja. Razlog ovome je što se prilikom zamaha stvara veća komponenta strujanja zraka prema gore na vanjskim dijelovima krila nego na unutarnjim.



Slika 4.2.1 Djelovanje aerodinamičkih sila u mahanju [5]

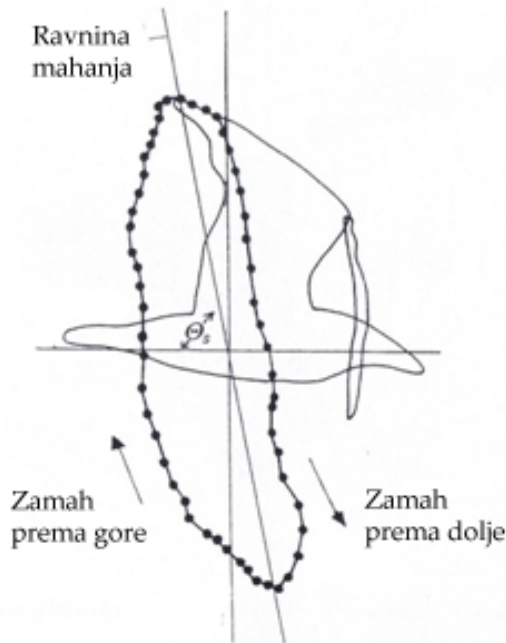
#### Prikaz mahanja krila oko zgloba

Na slici 4.2.2 je prikazan proces mahanja desnog krila ptice. Ovaj zglob je obično rameni zglob kod ptica na koji se spaja kost *humerus* koji se smatra univerzalnim zglobom koji prenosi sljedeće rotacije. Mahanje krila prikazano je kutom  $\beta$ , zabacivanje kutom  $\zeta$ , a uvijanje kutom  $\theta$ .



Slika 4.2.2 Pokreti krila prilikom mahanja [5]

Slika 4.2.3 prikazuje orbitu kretanja vrha krila u krstarećem letu prilikom mahanja gdje se može vidjeti kako je ravnina mahanja malo zabačena prema nazad. Vidljivo je kako krilo u jednom ciklusu mahanja zatvara eliptičnu konturu kojoj oblik varira ovisno o načinu zamaha krila.



Slika 4.2.3 Zatvorena kontura koju tvore vrhovi krila prilikom mahanja [5]

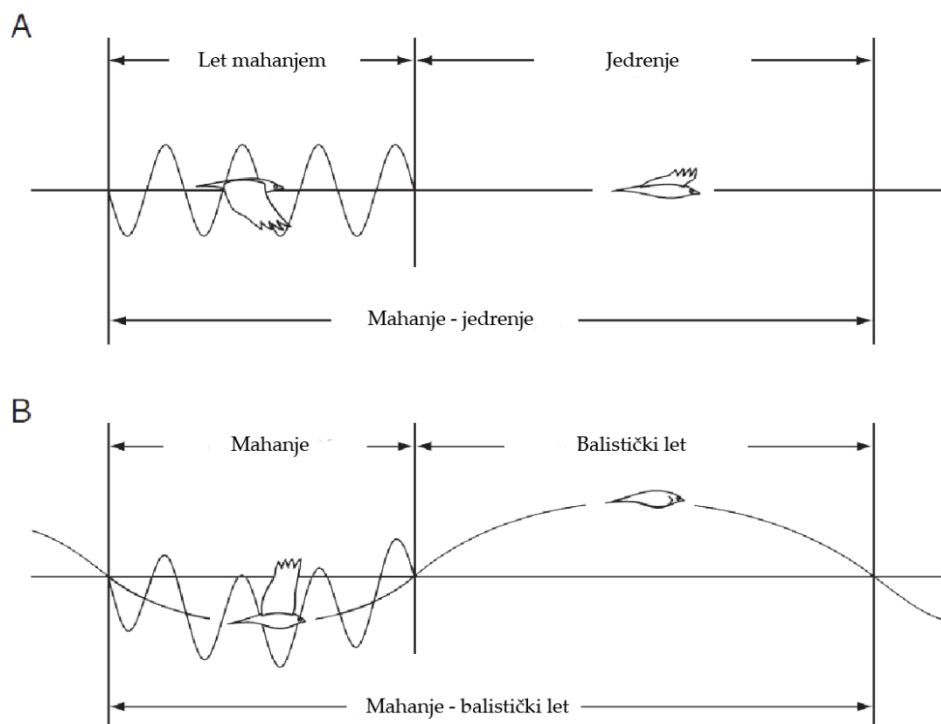
Postoji zanimljivost koju pojedine ptice čine pri kraju zamaha prema gore koja se može okarakterizirati kao lokalno uvijanje krila odnosno uvijanje primarnih pera pojedinačno. Naime pri završetku zamaha prema gore dolazi do potpune rotacije primarnih pera oko svoje osi kako bi dopustile što lakši protok zraka čime si povećavaju silu uzgona prema gore.

### 4.3. Krstarenje

Krstarenje je ravnotežan horizontalan let koji većinom koriste velike ptice koje ujedno i jedre. Glavna razlika između jedrenja i krstarenja je ta što ptice u jedrenju lagano gube visinu leta kako bi zadržale ravnotežan let bez ikakve upotrebe mahanja, dok se u krstarenju upravo pomoću minimalne potrebne snage mahanja održava konstantna visina i brzina leta.

#### 4.4. Isprekidan let

Izuzetno zanimljiv način leta koji izvodi veliki dio malih i velikih ptica naziva se isprekidan let. U osnovi ovaj način leta se sastoji od dva potpuno odvojena ciklusa koje ptica izvodi periodično. Prvi dio se može nazvati mahanje zbog toga što u tom trenu ptica zamahne krilima kako bi povećala brzinu na krilu, a samim time i silu uzgona dok se drugi dio sastoji od jedrenja gdje ptica ima krila potpuno mirna sve do idućeg ciklusa. Prvi ciklus mahanja je kraći od drugog.



Slika 4.4.1 Isprekidani način leta ptice a) mahanje-jedrenje, b) mahanje-balistička faza [8]

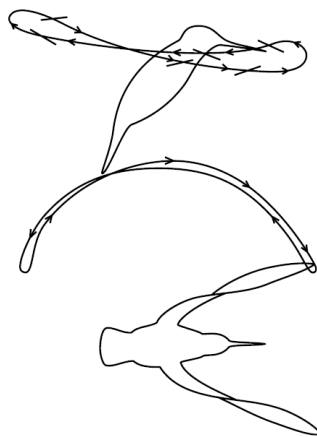
Dva moguća načina isprekidajućeg leta prikazuje slika 4.4.1. Prvi način izvode velike ptice izmjenjujući ciklus mahanja i jedrenja koji po svojim uvjetima odgovara krstarenju. Prvi period predstavlja mahanje koje završava jedrenjem uz održavanje konstantne visine i brzine leta. Upravo je ovo glavna razlika drugog načina isprekidanog leta vidljivog na slici b). U drugom načinu isprekidanog leta ptica u početnom dijelu zamahuje krilima i usmjerava tijelo prema gore čime povećava napadni kut cijelog tijela i počinje penjati u visinu. Na kraju zamaha ptica skuplja



krila uz tijelo te time tvori potpuno zatvorenu konturu tijela koje leti poput ispaljenog projektila pa se ova faza zove balistička faza. Nakon završetka balističke faze ptica širi krila i započinje novi ciklus mahanja. Mehanički gledano energija koja je potrebna za mahanje krila u isprekidanom letu je veća nego u letu s konstantnim mahanjem zbog toga što se mora nadoknaditi faza jedrenje.

#### 4.5. Lebdjenje

Lebdjenje je izrazito zahtjevna vještina leta koju izvode ptice i insekti. Samo rijetke ptice su usavršile ovaj način leta, a najpoznatija od njih je kolibrić. Većina ptica može zalebdjeti na mjestu, ali samo na trenutak prilikom slijetanja kako bi izveli glatko slijetanje. Velike ptice poput jastreba mogu zalebdjeti u zraku ali oni to postižu tako da se postave suprotno strujanju vjetra pa si tako osiguraju povećano strujanje zraka na krilima, međutim samo na trenutak. Osim ptica insekti su puno bolji letači u lebdjenju pa se upravo njih proučava u razvoju mikro bespilotnih letjelica. Slika 4.5.1 prikazuje pokrete kolibrića u lebdjenju gdje se vidi kako maše krilima u krivulji koja ima oblik osmice tako da stvara uzgon sa obje strane krila ovisno o okretu krila.



Slika 4.5.1 Grafički prikaz mahanja kolibrića [4]

## 4.6. Polijetanje i slijetanje

Kao što se zrakoplovi moraju zaletjeti na uzletno sletnoj stazi kako bi ostvarili dovoljnu brzinu opstrujavanja krila koja im pruža aerodinamički uzgon, isto tako i ptice moraju imati nekakvu vrstu zaleta prije samog leta. Velike ptice koje imaju duge noge zatrčavaju se po površini koja može biti i voda. Pelikani, labudovi i patke prilikom polijetanja brzinu postižu tako da se zatrče po površini vode te se nogama dodatno odguruju od površine. Albatrosi polijeću tako da se zatrče niz brdo jer imaju izrazito velika krila koja nisu podobna za snažna mahanja. Malene ptice imaju kratke, ali snažne noge pomoću kojih se odbacuju u zrak.

Prilikom slijetanja ptice moraju postaviti krila u položaj u kome znatno povećavaju aerodinamički otpor krila koji smanjuje brzinu, ali pri tome moraju zadržati dovoljno uzgona kako bi se održale u zraku. Povećanje otpora se izvodi tako da ptice dižu krila kojim formiraju slovo V. Primarna pera potpuno se rašire kako bi postigli što veći procijep među njima a pera *alula* također se izvlače te služe kao generatori vrtloženja odnosno kao zračne kočnice na zrakoplovu. Rep ptice je također važan za slijetanje obzirom da s njime ptica znatno povećava ukupan otpor.

## 5. Model krila albatrosa

---

Zadatak ovog rada bio je izabrati zaseban element nekog biološkog letećeg sustava te ga konstruirati i usporediti s tehničkim sustavima. Kao element je odabrano krilo albatrosa koje je zanimljivo za razumijevanje konstrukcije krila ptice. Napravljen je model krila u CAD programu Pro/ENGINEER, a analiza čvrstoće izvedena je pomoću programa Abaqus. Nakon što je izvršena analiza čvrstoće za krilo ptice napravljena je nova analiza koja predstavlja tehnički sustav koji bi se mogao napraviti s današnjom tehnologijom te su podaci uspoređeni. Treća analiza čvrstoće izvršena je na modelu koji je građen od materijala koji će biti dostupni kroz deset godina.

## 5.1. Krilo albatrosa

Na slici 5.1.1. je prikazan albatros s potpuno raširenim krilima u letu. Prosječni odrasli albatros ima masu približno 10 kg, a raspon krila 3 m. Albatros je najveća ptica na svijetu a, kroz povijest su znali biti primjerci kojima su krila imala raspon do 5 m. Konstrukcija krila mu je izuzetno lagana i čvrsta. Od ukupne mase tijela masa krila zauzima maksimalno 20 %. Visoka vitkost krila mu omogućava da većinu leta provodi u jedrenju bez potrebe za mahanjem. U poglavlju 4.1.1. je prikazan jedinstven način leta kojim se koriste albatrosi, a koji je pridonio razvoju modernih jedrilica i razumijevanju jedrenja. Krilo albatrosa je izvrstan primjer za proučavanje obzirom da je veoma slično zrakoplovnom krilu pa se može usporediti s jedrilicama koja imaju veliku vitkost krila poput albatrosa. Nadalje krilo albatros zatvara punu konturu te je jednostavnije za analizu od recimo krila sokola koji osim kraćih i debljih krila ima i procijepe između pera. Tablica 5.1.1. prikazuje geometrijske karakteristike albatrosa u usporedbi sa drugim pticama.



Slika 5.1.1 Albatros u letu [14]

Tablica 5.1.1 Geometrijske karakteristike pojedinih ptica [5]

Vrsta	Albatros	Orao	Dugouhi šišmiš	Kolibrić
Raspon krila [m]	3	1.63	0.27	0.0956
Površina krila [m <sup>2</sup> ]	0.667	0.431	0.0123	0.00113
Vitkost krila	18	6.17	5.93	8.1
Masa [kg]	10	1.8	0.009	0.0037
Opterećenje krila [N/m <sup>2</sup> ]	147	40.8	7.17	32
Napadni kut krila $\alpha$	5.2	4.4	13.2	4.67
Minimalni koef. otpora $C_{D0}$	0.009	0.013	-	-

Konstruktivski gledano, krilo albatrosa se sastoji od kostura, mišića, kože i pera. Većinu konstrukcije čine upravo pera koju su glavno obilježje svake ptice. Krilo se dijeli na dvije glavne vrste pera, primarne i sekundarne. Primarnih pera postoji 10-11 kao i kod većine ptica, međutim sekundarnih pera može biti od 20 do 35 ovisno o dužini krila. Kost krila su duge do 30 cm, a šuplji cjevasti profil krila ima debljinu oko 1.5 cm na kosti *humerus* dok kost *radius, ulna* i *metacarpals* imaju manji poprečni presjek oko 1 cm. Slika 5.1.2. prikazuje konstrukciju krila ali isto tako i unutarnje organe i mišiće. Kako se vidi sa slike albatrosi imaju bijela slabija pera s donje strane dok im je gornja površina krila potpuno obložena crnim perima.



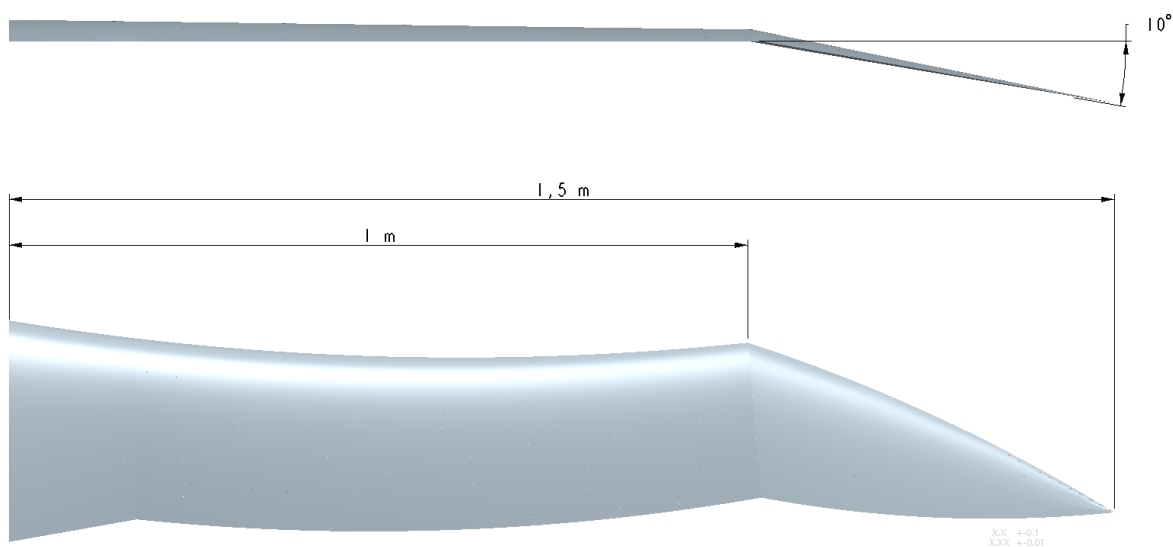
Slika 5.1.2 Konstrukcija albatrosa [14]

## 5.2. Model krila u Pro/ENGINEER-u

Slika prikazuje pravo krilo albatrosa sa svim potrebnim dimenzijama. Debljina i zakrivljenost krila su procijenjeni na osnovi različitih slika obzirom da nigdje u literaturi ne postoji točni podaci. Krilo je modelirano kao tanka zakrivljena površina kako bi se lakše mogla analizirati u programu Abaqus. Površina samog krila je podijeljena na manje površine kako bi se u Abaqus-u mogla izvesti pravilna mreža konačnih elemenata. Model krila je eksportiran u STP formatu kako bi se mogao importirati u Abaqus.



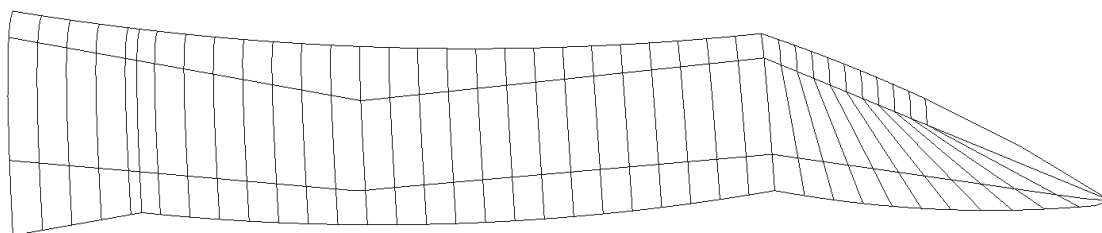
5.2.1 Dimenzije krila albatrosa [15]



5.2.2 Model krila albatrosa u Pro/ENGINEER-u

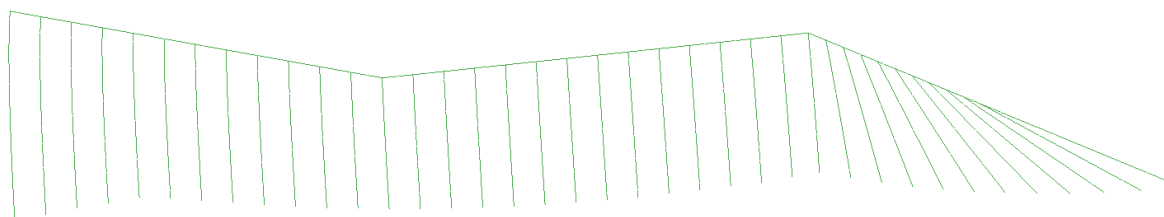
### 5.3. Model krila u Abaqus-u

Slika 5.3.1 prikazuje krilo albatrosa podijeljeno na 112 površina radi jednostavnije izrade mreže konačnih elemenata.

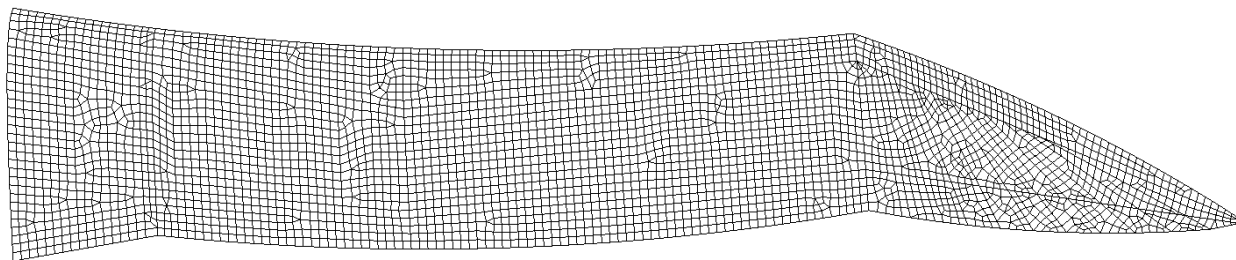


#### 5.3.1 Krilo albatrosa podijeljeno na površine u Abaqus-u

Slika 5.3.2 prikazuje konstrukciju kostura ptice s perima. Kost i pera su izvedeni pomoću grednih elemenata. Kost i su podijeljene na tri zasebne grede koje imaju cjevasti poprečni presjek gdje kost *humerus* ima najdeblji poprečni presjek, kojemu je vanjski promjer 1.5 cm, a unutrašnji 0.75 cm. Kost *radius*, *ulna* i *metacarpals* imaju vanjski promjer 1 cm, a unutrašnji 0.5 cm. Stvarna pera ptice imaju šuplji dio nosive grede u korijenu koji je dug približno 3 cm, a ostatak grede je punog profila koji ima oblik zaokruženog četverokuta. Greda pera je aproksimirana punim kružnim profilom promjera 0.4 cm. Oplata krila koja se sastoji od pera odnosno dlačica pera je izvedena pomoću ljuskastih elemenata različite debljine. Slika 5.3.3. prikazuje završnu mrežu konačnih elemenata cijelog krila u koje su uključeni ljuskasti i gredni elementi.

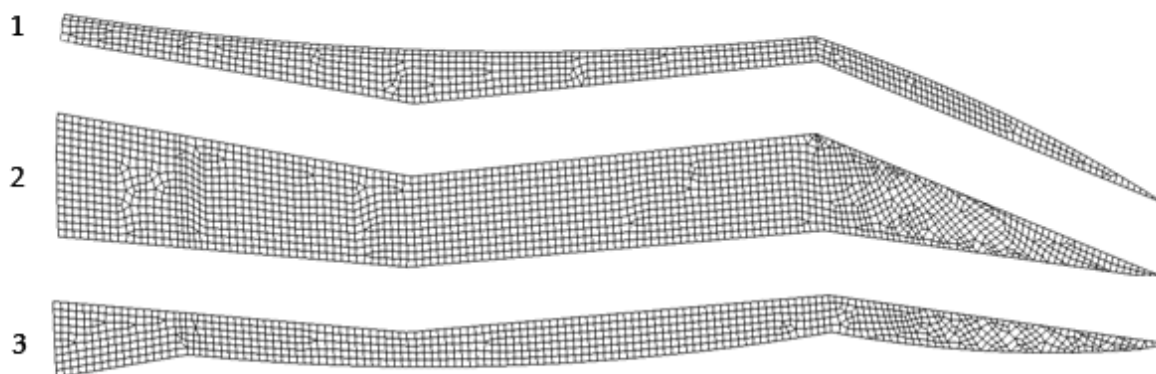


#### 5.3.2 Kost i pera krila albatrosa u Abaqus-u



### 5.3.3 Mreža konačnih elemenata modela krila

Oplata krila je podijeljena na tri cjeline koje imaju različite debljine. Slika 5.3.4 prikazuje cjeline oplatae gdje oplata na napadnoj ivici ima debljinu 3 mm i to je najdeblja oplata obzirom da se ovdje nalaze najgušće postavljena mala pera, ali isto tako postoji dodatna koža i tkivo koje nisu modelirani posebnim materijalima već je pretpostavka da njihov doprinos čvrstoći ulazi u debljinu oplatae koja je izrađena od keratina. Srednji dio oplatae je debljine 2 mm iako postoje podaci da on može biti i veći obzirom da se na ovome mjestu preklapa nekoliko redova pera. Izlazna ivica krila je izvedena debljinom od 1 mm jer se ovdje samo najduža pera preklapaju u jednom redu.

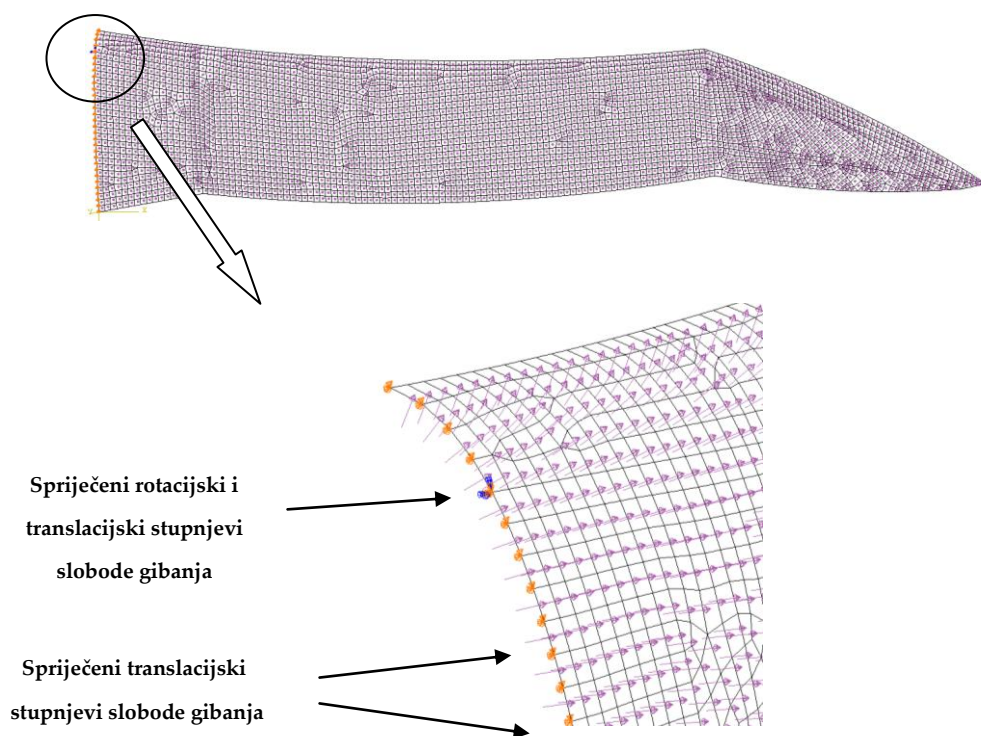


### 5.3.4 Mreža konačnih elemenata modela krila podijeljena na tri cjeline



## 5.4. Rubni uvjeti i opterećenje krila

Rubnim uvjetima ograničava se gibanje krila kako bi podaci dobiveni u analizi bili što bliže stvarnim podacima. Krilu je gibanje ograničeno tako da su translacije u tri smjera X Y i Z potpuno spriječene na rubu spoja krila s trupom ptice. Osim ovog rubnog uvjeta dodatno su spriječene rotacije oko tri osi X Y i Z u točki grede gdje se kost krila spaja s trupom. Ovo ograničenje proizlazi iz konstrukcije krila albatrosa koje ima mogućnost zaključavanja krila u ramenu pri potpuno ispruženom položaju. Slika 5.4.1. prikazuje rubne uvjete krila u spoju krila s trupom.



### 5.4.1 Rubni uvjeti modela krila

Opterećenje krila izvedeno je pomoću tlačnog opterećenja u iznosu od  $150 \text{ N/m}^2$  prema [5]. Ovo opterećenje krila predstavlja težinu cijele ptice podijeljenu s površinom krila, odnosno govori koliko opterećenje krilo mora svladati kako bi održalo cijelu težinu ptice u zraku. Ovaj uvjet se ostvaruje u ravnotežnom letu kada su svi momenti koji djeluju na pticu jednaki 0, a sila uzgona se suprotstavlja težini

tijela. Slučaj ravnotežnog leta je idealan slučaj u letu, ali opterećenja krila mogu znatno rasti prilikom izvođenja brzih manevara ili prilikom slijetanja. Opterećenje prikazano na slici 5.4.2. je postavljeno u smjeru prema gore kako bi simuliralo djelovanje sile uzgona na krilo.

## 5.5. Materijal

Prva analiza koja se provodi je aproksimacija stvarnog biološkog sustava s njegovim materijalnim svojstvima. Krilo ptice je podijeljeno na kostur i oplatu. Mišići i tkivo koji se nalaze na krilu se zanemaruju čime se ne čini znatnija greška obzirom da su zanemarive mase, budući da je krilo albatrosa optimizirano za jedrenje. Za analizu čvrstoće u programu Abaqus potrebni su podaci za modul elastičnosti, Poissonov koeficijent i gustoću. Podaci za materijal keratin uzeti su iz [12] gdje su dobivene vrijednosti pretpostavljene za izotropni materijal. Podaci za materijal kosti dobiveni su iz [16] gdje su vrijednosti uzete za kost guske. Tablica 5.5.1 prikazuje svojstva materijala kosti i keratina.

Tablica 5.5.1 Svojstva materijala kosti i keratina

Materijal	Keratin	Kost
Modul elastičnosti [GPa]	2.5	13.2
Poissonov koeficijent [-]	0.3	0.35
Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	1150	1300

Druga analiza izvršena je pomoću tehničkih materijala koji su dostupni u današnjoj tehnologiji. Kao zamjena materijalu kosti primijenjena je legura aluminija 2024 prema [17] koja se često koristi u zrakoplovstvu dok je zamjena materijalu keratin uzet polikarbonat prema [18]. Svojstva polikarbonata su veoma slična keratinu tako da su ga u potpunosti nadomjestila po gustoći i po modulu elastičnosti.

Tablica 5.5.2 Svojstava materijala polikarbonat i aluminij

Materijal	Polikarbonat	Aluminij 2024
Modul elastičnosti [GPa]	2.2	73
Poissonov koeficijent [-]	0.37	0.33
Gustoća [kg/m³]	1210	2730

Treća analiza izvršena je pomoću materijala koji bi se mogli primjenjivati u narednih 10 godina. Oplata, kostur i pera su u potpunosti izvedeni pomoću kompozitnog materijala koji se najčešće koristi u zrakoplovstvu, a to je epoksidna smola ojačana ugljičnim vlaknima. Obzirom da Abaqus nema mogućnost modeliranja kompozitnih grednih elemenata, korišten je postupak određivanja homogeniziranih svojstava grednih konačnih elemenata prema [19]. Primjenom ovog postupka moguće je izračunati ekvivalentna izotropna svojstva materijala i ekvivalentne momente tromosti presjeka grede, koji se u programima za analize metodom konačnih elemenata zadaju homogenim grednim konačnim elementima kako bi se aproksimirao odziv kompozitnih greda.

Ekvivalentna krutost grede određuje se sljedećim izrazima:

$$ES = \int_S E_i dS = \sum_{i=1}^n E_i S_i \quad (1)$$

$$GS = \int_S G_i dS = \sum_{i=1}^n G_i S_i \quad (2)$$

gdje je  $s$   $n$  označen ukupan broj slojeva. Površine  $S_i$  i momenti tromosti  $I_{zi}$  računaju se za geometrijske karakteristike jednosmjernih slojeva, a svojstva materijala  $E_i$  i  $G_i$  odnose se na svojstva u smjeru globalnog koordinatnog sustava duž grede. Za slojeve koji su orijentirani u smjeru globalnog koordinatnog sustava ( $x, y, z$ ) vrijedi da je  $E_i = E_1$  i  $G_i = G_{12}$ . Za slojeve orijentirane pod kutom  $\theta$  u odnosu na globalni koordinatni sustav ove se vrijednosti moraju transformirati iz materijalnih

koordinatnih sustava (1,2,3) u globalni koordinatni sustav. Ove transformacije imaju oblik [20]:

$$\frac{1}{E_x} = \frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \frac{\sin^4 \theta}{E_2} + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left( \frac{1}{G_{12}} - 2 \frac{\nu_{12}}{E_1} \right) \quad (3)$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = 4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left( \frac{1 + \nu_{12}}{E_1} + \frac{1 + \nu_{21}}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right) + \frac{1}{G_{12}} \quad (4)$$

Ako se odabere da je površina presjeka homogenizirane grede ista kao i pravi presjek kompozitne grede dobiju se izrazi za ekvivalentna svojstva materijala:

$$E_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i S_i}{S} \quad (5)$$

$$G_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i S_i}{S} \quad (6)$$

gdje  $S$  predstavlja ukupnu površinu poprečnog presjeka grednog elementa. Tablica 5.5.3 prikazuje svojstva homogeniziranog kompozitnog materijala izračunatog za primjer grednih elemenata kostura i pera krila ptice. Korištenjem izraza (6) i (7) dobivene su vrijednosti za izotropni materijal kojemu je Poissonov koeficijent iznosio više od 0.5 pa je prema tome uvedena inženjerska aproksimacija prema kojoj je  $E_{eq}$  uzet prema formuli (6) a,  $G_{eq}$  je izračunat s pretpostavkom Poissonovog koeficijenta od 0.33. Vrijednosti dobivene proračunom su dane u tablici 5.5.3.

Tablica 5.5.3 Svojstva homogeniziranog kompozitnog materijala drugog tehničkog sustava

Element	Ukupan broj slojeva	Debljina jednog sloja [mm]	$E_{eq}$ [GPa]	$G_{eq}$ [GPa]
Kost <i>humerus</i>	25	0.125	70.969	26.68
Kost <i>radius</i> i <i>ulna</i>	17	0.125	61.833	23.24
<i>Rachis</i> pera	5	0.125	46.78	17.58

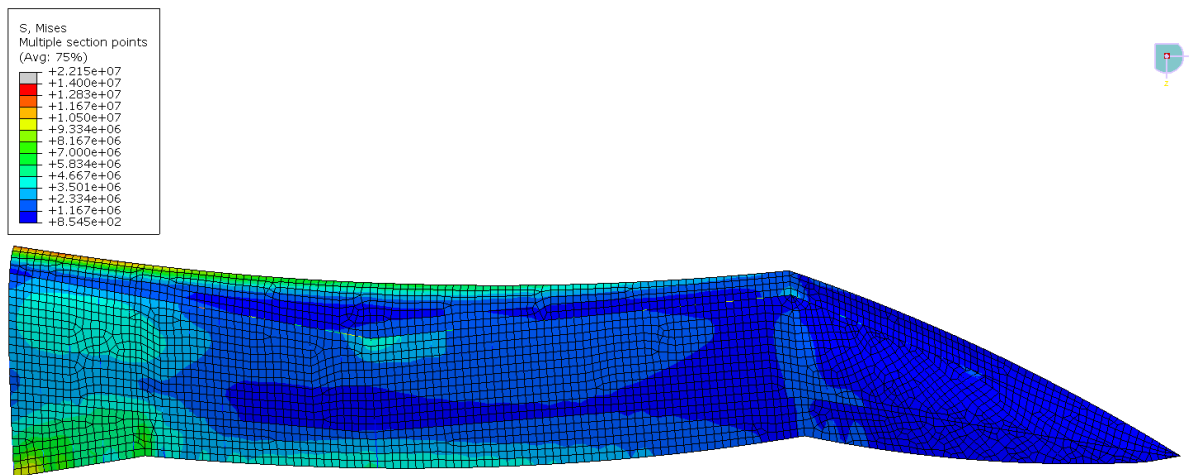
## 6. Rezultati analize

---

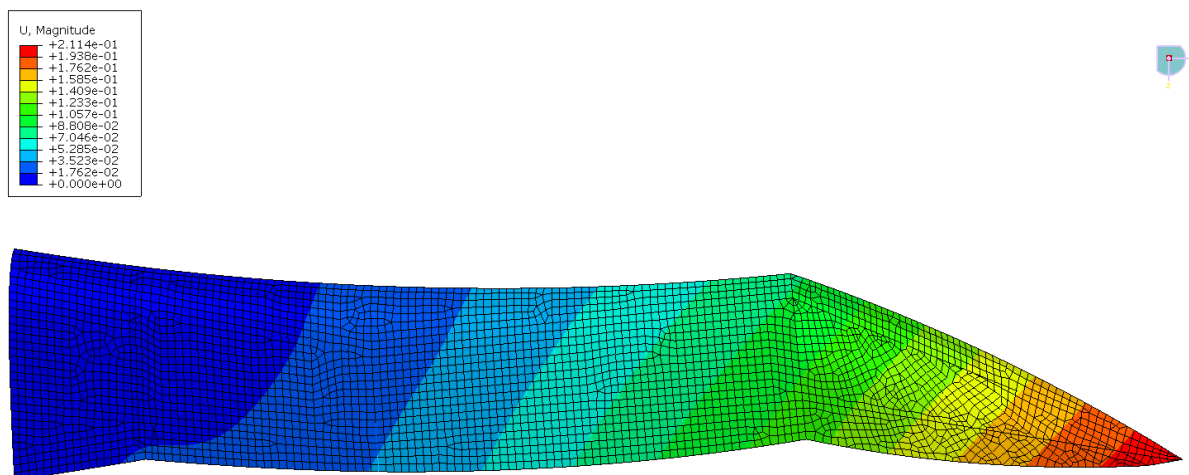
Nakon provedene analize dobiveni su rezultati za naprezanja i pomake konstrukcije. U ovom poglavlju prikazane su usporedbe dobivenih rezultata za tri tipa analize. Prva analiza i njeni rezultati koji predstavljaju stvarni biološki sustav odnosno stvarno krilo ptice albatrosa prikazani su u poglavlju 6.1. Analize tehničkih sustava prikazane su u poglavljima 6.2. i 6.3. Nakon provedene linearne analize izvršena je i nelinearna analiza obzirom da su rezultati linearne analize pokazivali velike pomake konstrukcije. Na kraju poglavlja dana je usporedba rezultata u tabličnom prikazu za tri linearne i tri nelinearne analize.

### 6.1. Linearna analiza čvrstoće stvarnog krila albatrosa

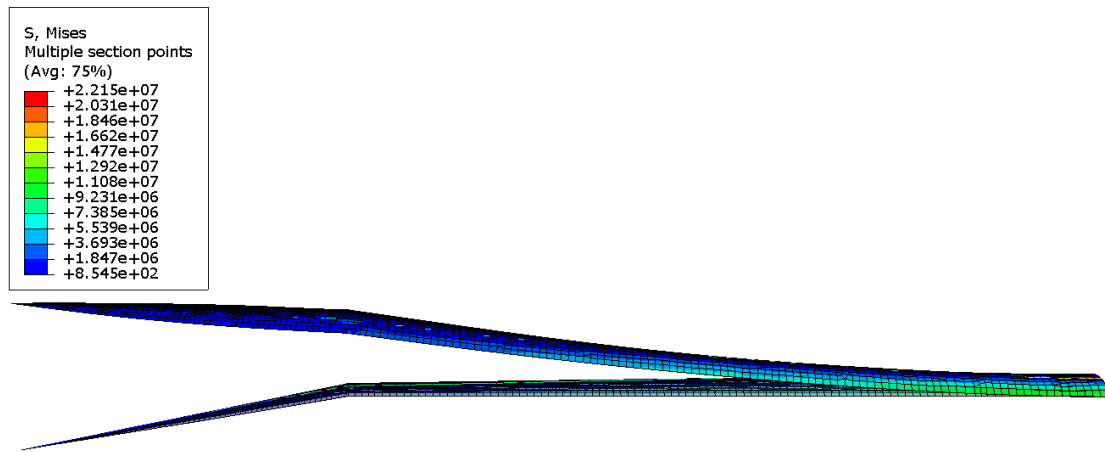
Rezultati analize čvrstoće krila provedene metodom konačnih elemenata u programu Abaqus prikazani su na slikama od 6.1.1 do 6.1.4. Prema analizi najveće naprezanje iznosi 22.1 MPa i nalazi se na spoju između dvije kosti *humerus* i *radius*. Najveći pomak je na vrhu krila i iznosi 21 cm. Masa modela krila iznosi : 0.71 kg.



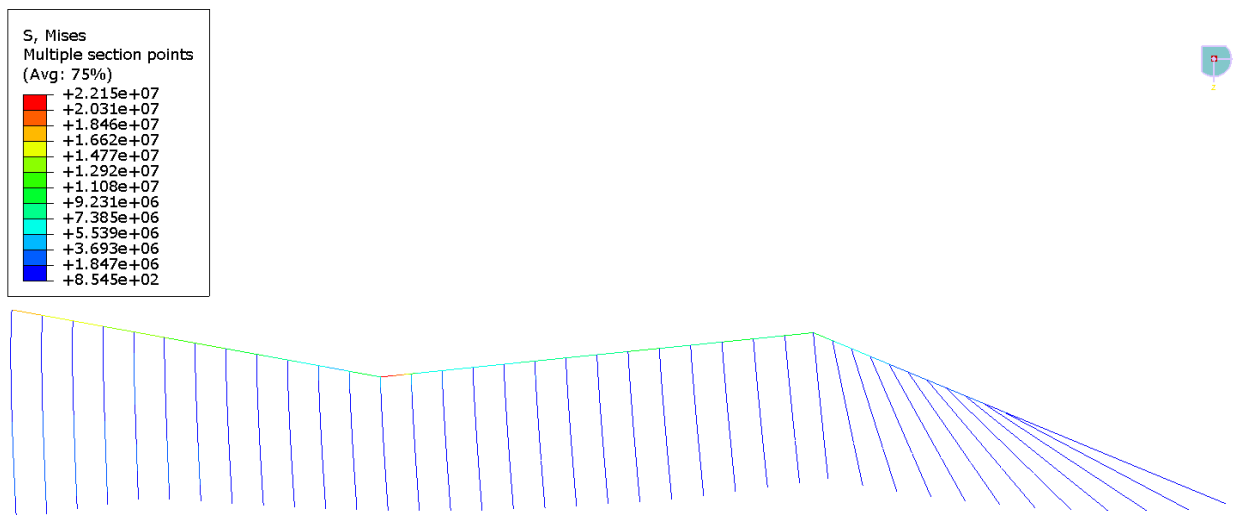
Slika 6.1.1 Ekvivalentno naprezanje stvarnog krila prema V.Mises-u [Pa]



Slika 6.1.2 Pomaci stvarnog krila [m]



Slika 6.1.3 Ekvivalentno naprezanje stvarnog krila prema V.Mises-u [Pa]

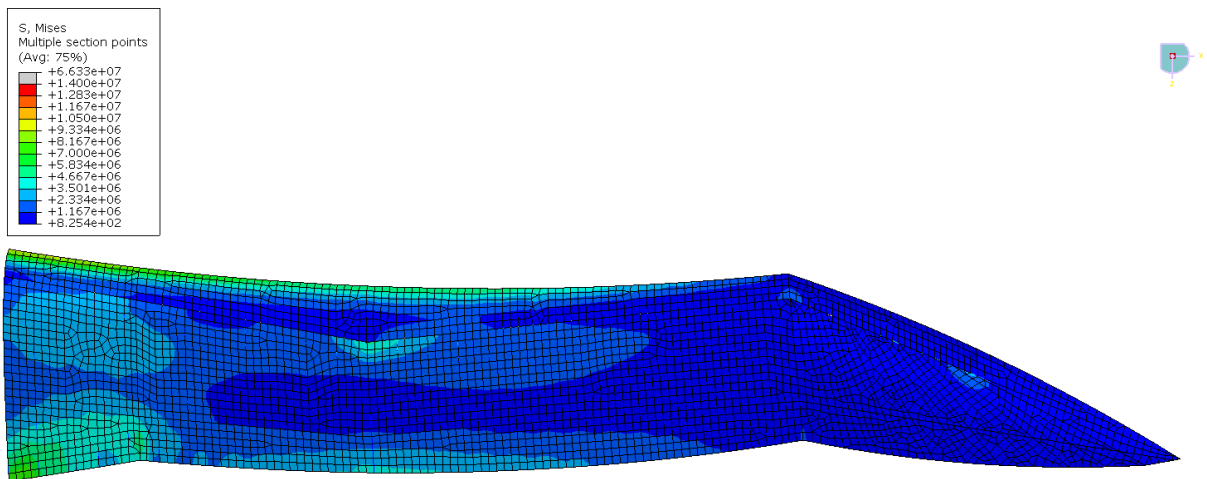


Slika 6.1.4 Naprezanja krila u grednim elementima stvarnog krila [Pa]

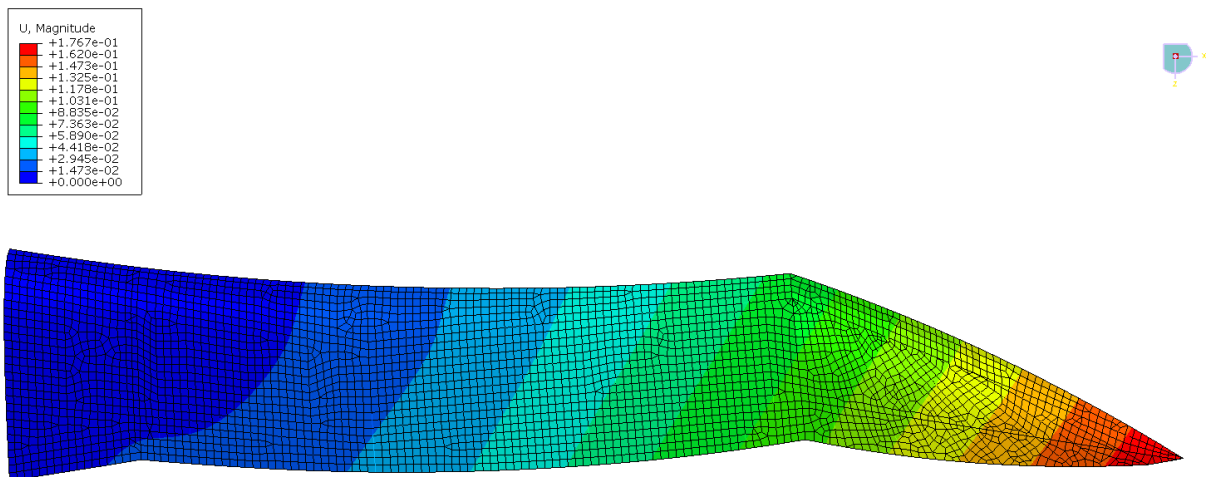
Slika 6.1.4. prikazuje naprezanja koja se javljaju u grednim elementima krila. Vidljivo je kako grede kostura imaju najveća naprezanja u konstrukciji što je očekivano obzirom da su one glavni nosivi dio konstrukcije.

## 6.2. Linearna analiza čvrstoće prvog tehničkog sustava

Rezultati linearne analize čvrstoće prvog tehničkog sustava provedene metodom konačnih elemenata u programu Abaqus prikazani su na slikama 6.2.1. do 6.2.4. Prema analizi najveće naprezanje iznosi 66.3 MPa i nalazi se na spoju između kosti *humerus* i tijela ptice. Najveći pomak je na vrhu krila i iznosi 17.6 cm.

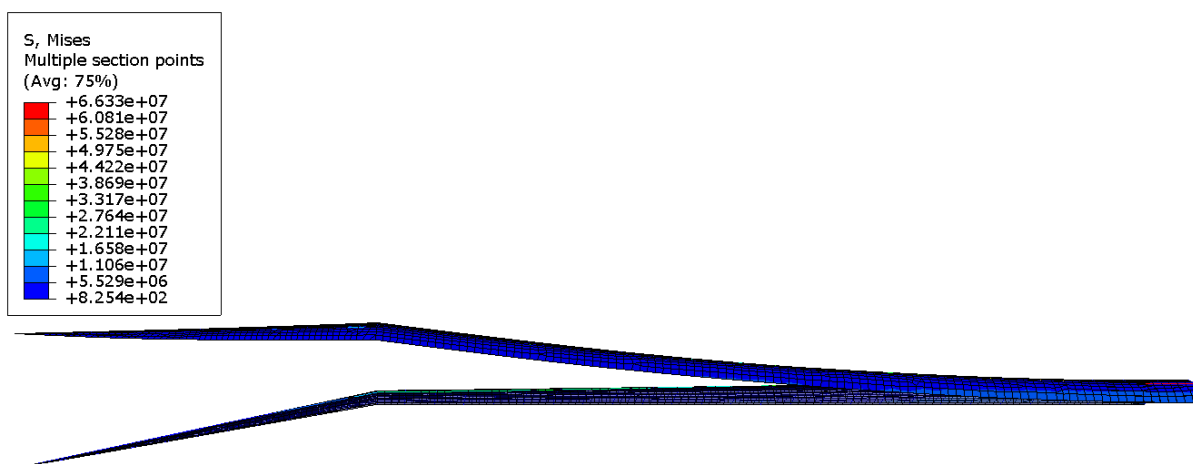


Slika 6.2.1 Ekvivalentna naprezanja krila prvog tehničkog sustava prema V. Mises-u [Pa]

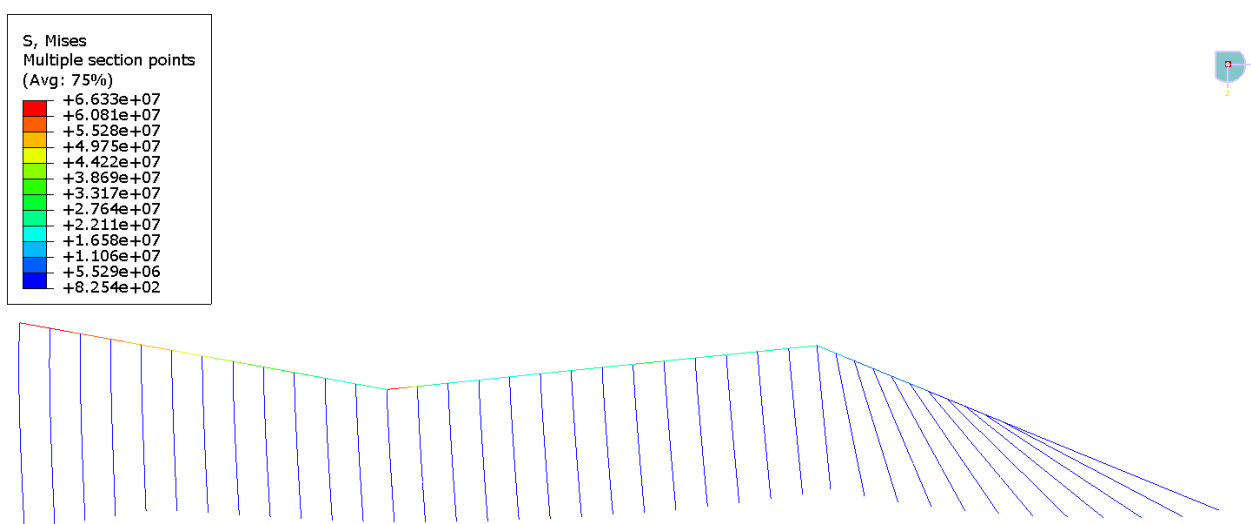


Slika 6.2.2 Pomaci krila prvog tehničkog sustava [m]





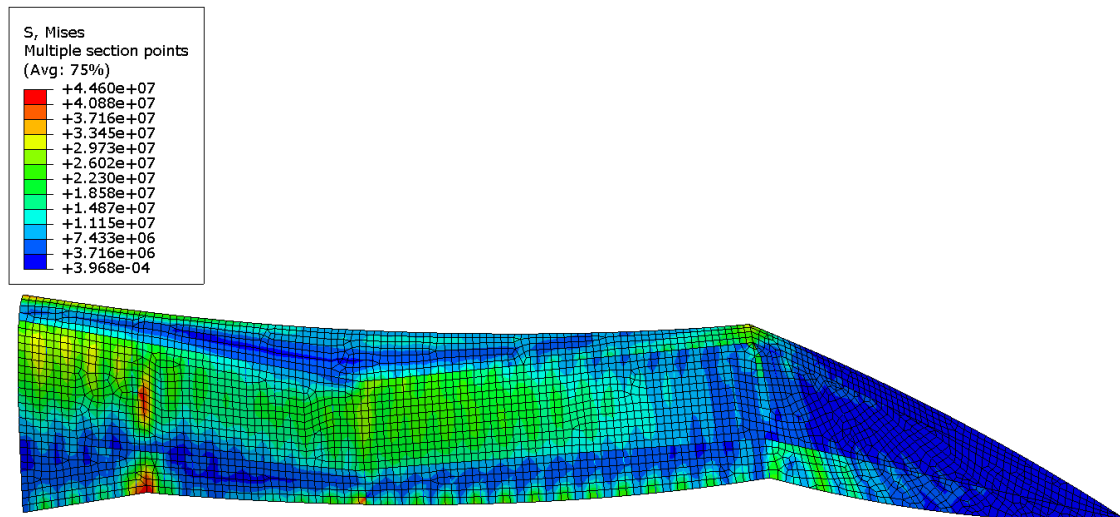
Slika 6.2.3 Ekvivalentna naprezanja krila prvog tehničkog sustava prema V. Mises-u [Pa]



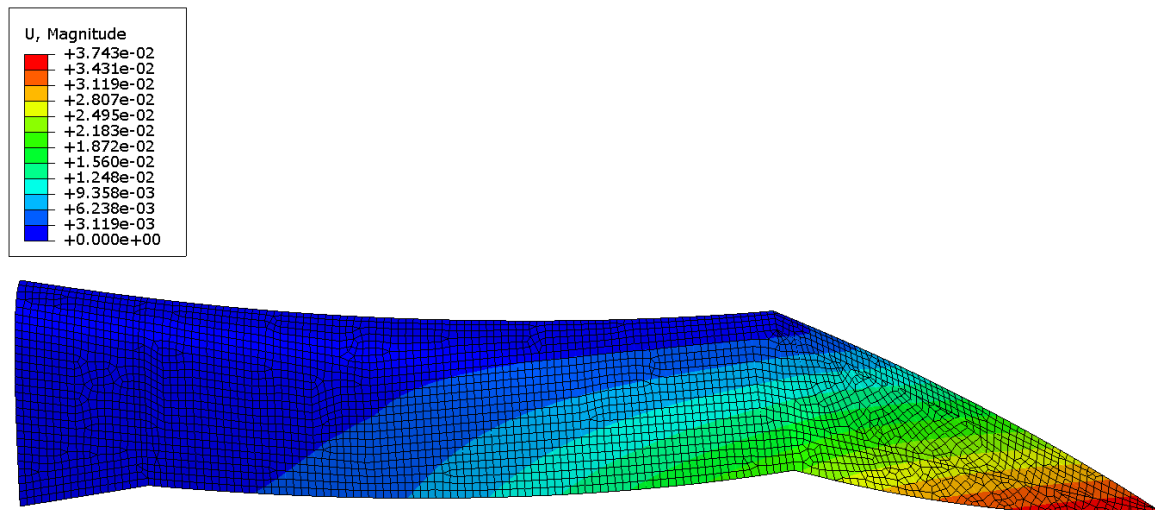
Slika 6.2.4 Naprezanja krila u grednim elementima prvog tehničkog sustava [Pa]

### 6.3. Linearna analiza čvrstoće drugog tehničkog sustava

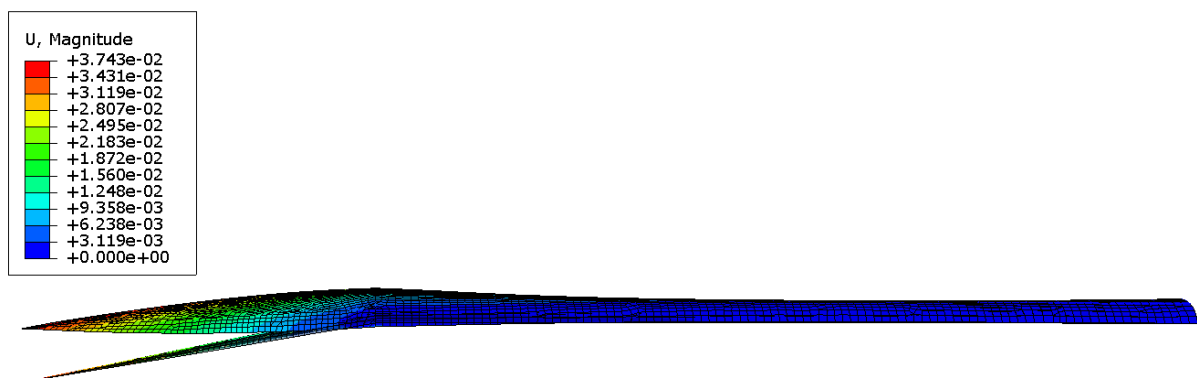
Rezultati analize čvrstoće krila drugog tehničkog sustava provedene metodom konačnih elemenata u programu Abaqus prikazani su na slikama 6.3.1. do 6.3.4. Za razliku od ostalih analizi kod kompozitne konstrukcije najveće naprezanje iznosi 44.6 MPa i nalazi se na oplati blizu spoja krila sa trupom. Razlog ovome su elastična svojstva materijala oplata, koja je kruća pa samim time i preuzima veća naprezanja. Najveći pomak konstrukcije je na vrhu krila i iznosi 3.7 cm.



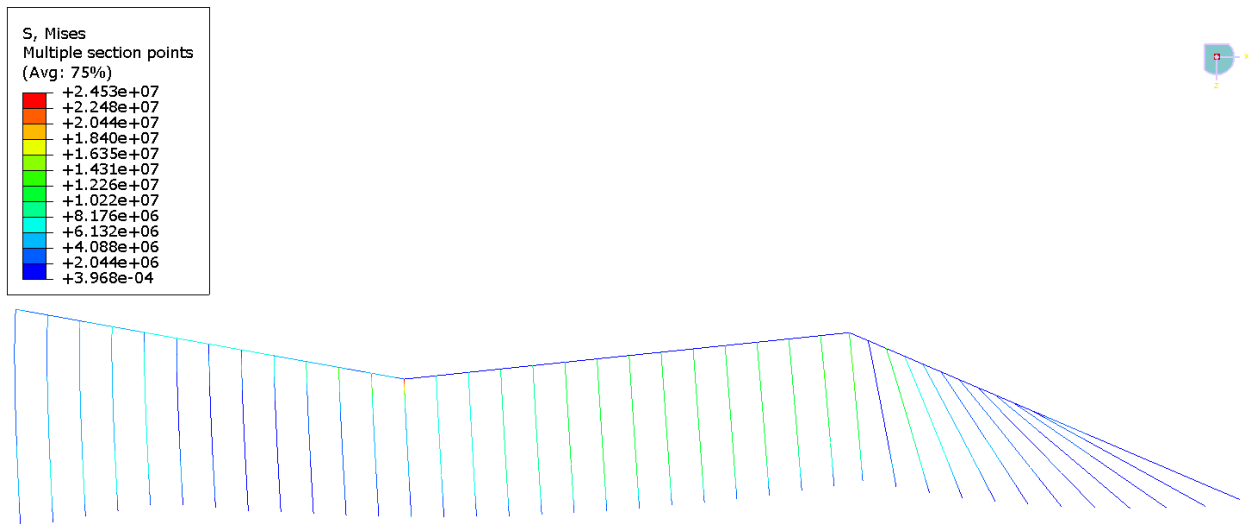
Slika 6.3.1 Ekvivalentna naprezanja krila drugog tehničkog sustava prema V. Mises-u [Pa]



Slika 6.3.2 Pomaci krila drugog tehničkog sustava [m]



Slika 6.3.3 Ekvivalentna naprezanja krila drugog tehničkog sustava prema V. Mises-u [Pa]. Prikaz sa faktorom povećanja 3

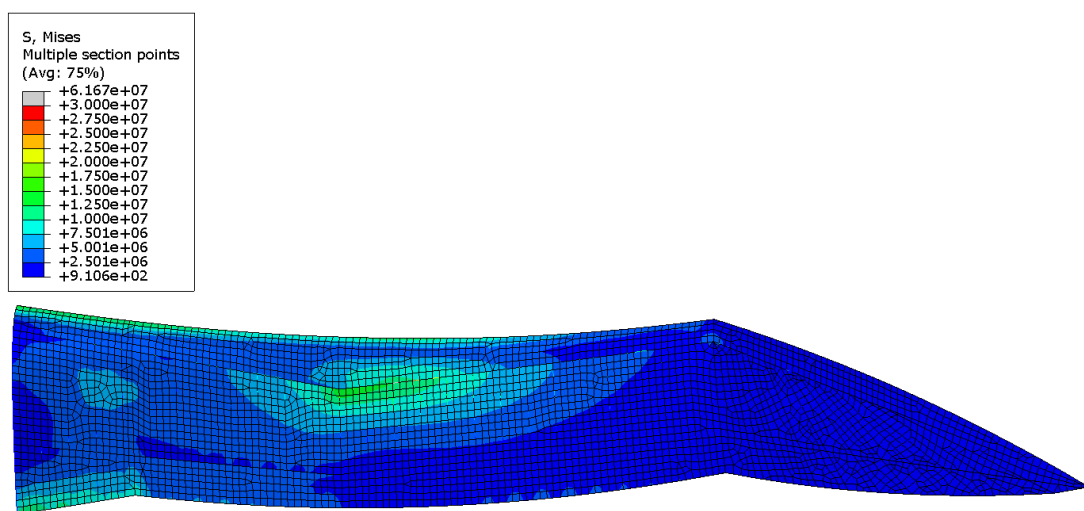


Slika 6.3.4 Naprezanja krila u grednim elementima drugog tehničkog sustava [Pa]

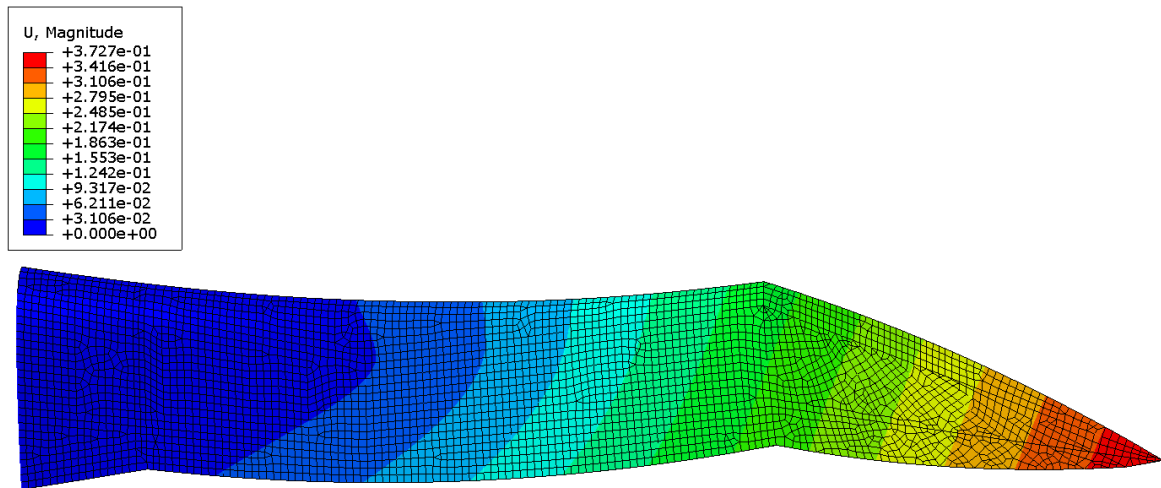
#### 6.4. Nelinearna analiza stvarnog sustava

Nakon preliminarnih linearnih proračuna uočeni su veliki pomaci vrhova krila te je stoga ponovljena nelinearna geometrijska analiza kako bi se bolje opisali veliki pomaci pojedinih konstrukcijskih elemenata.

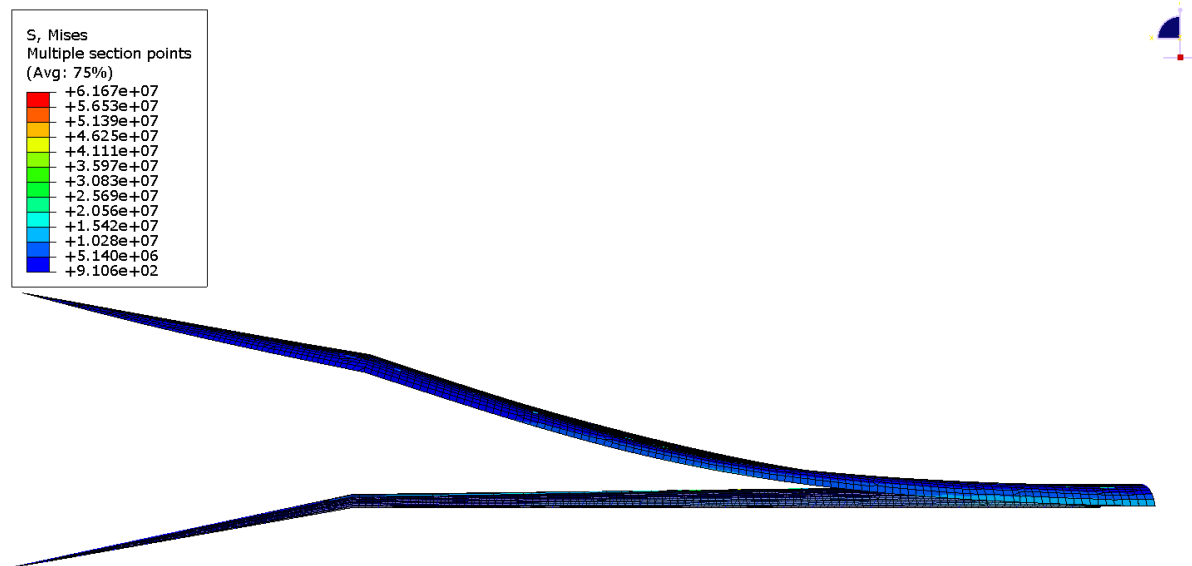
Rezultati nelinearne analize čvrstoće stvarnog krila provedene metodom konačnih elemenata u programu Abaqus prikazani su na slikama 6.4.1. do 6.4.4. Prema analizi najveće naprezanje iznosi 61.6 MPa i nalazi se na spoju kosti *humerus* i petog pera *secondaries*. Najveći pomak konstrukcije je na vrhu krila i iznosi 37 cm.



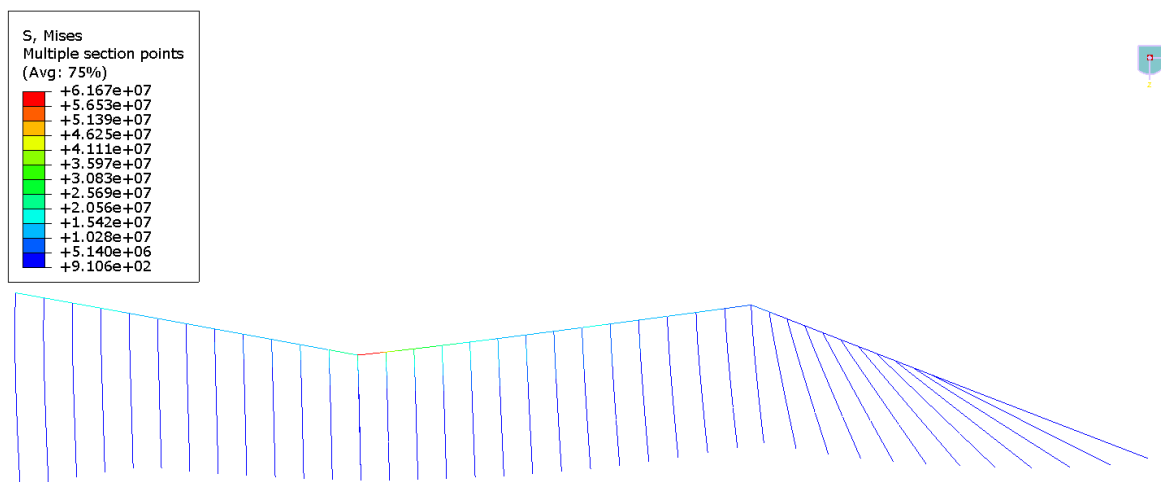
Slika 6.4.1 Ekvivalentno naprezanje stvarnog krila prema V.Mises-u [Pa]



Slika 6.4.2 Pomaci stvarnog krila [m]



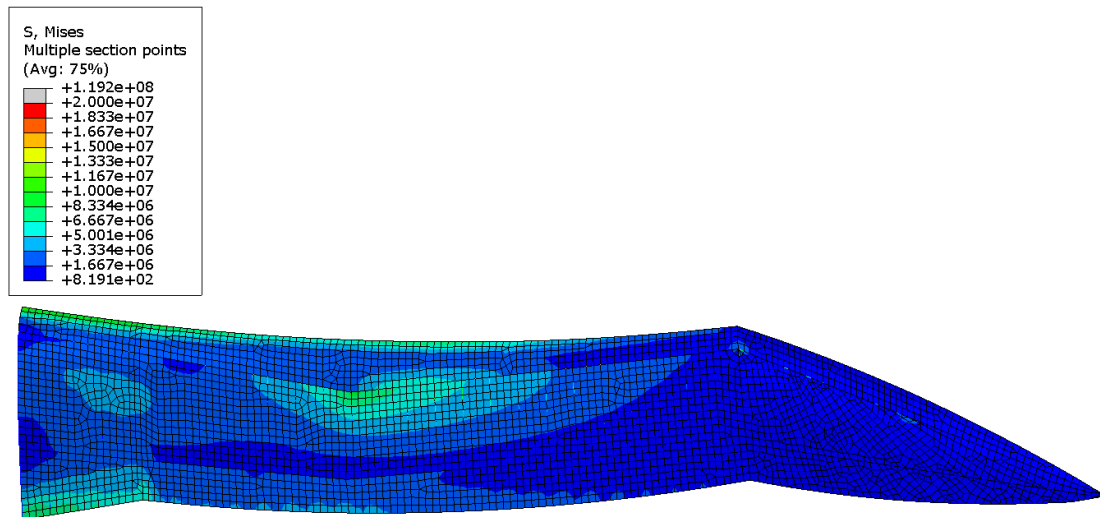
Slika 6.4.3 Ekvivalentno naprezanje stvarnog krila prema V.Mises-u [Pa]



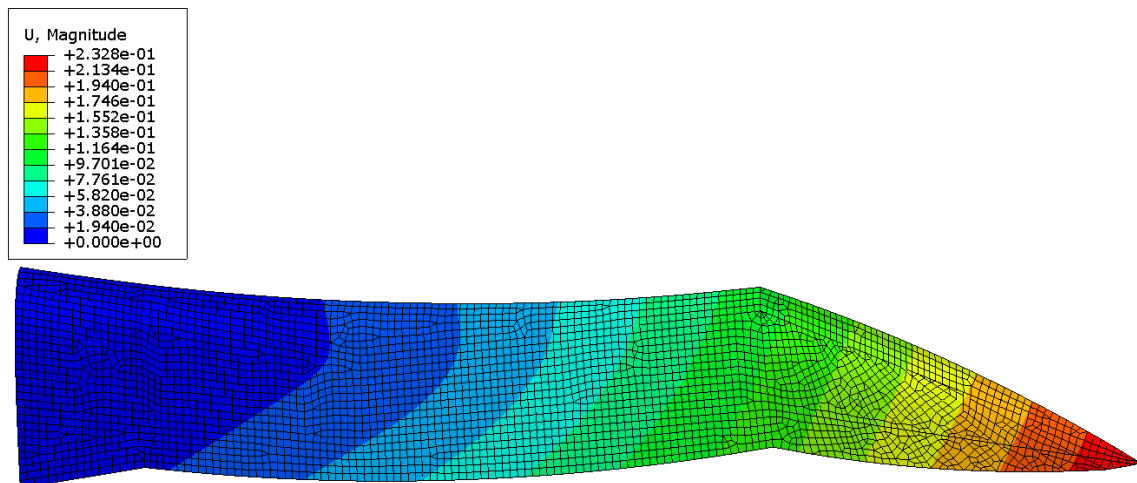
Slika 6.4.4 Naprezanja krila u grednim elementima stvarnog krila [Pa]

## 6.5. Nelinearna analiza prvog tehničkog sustava

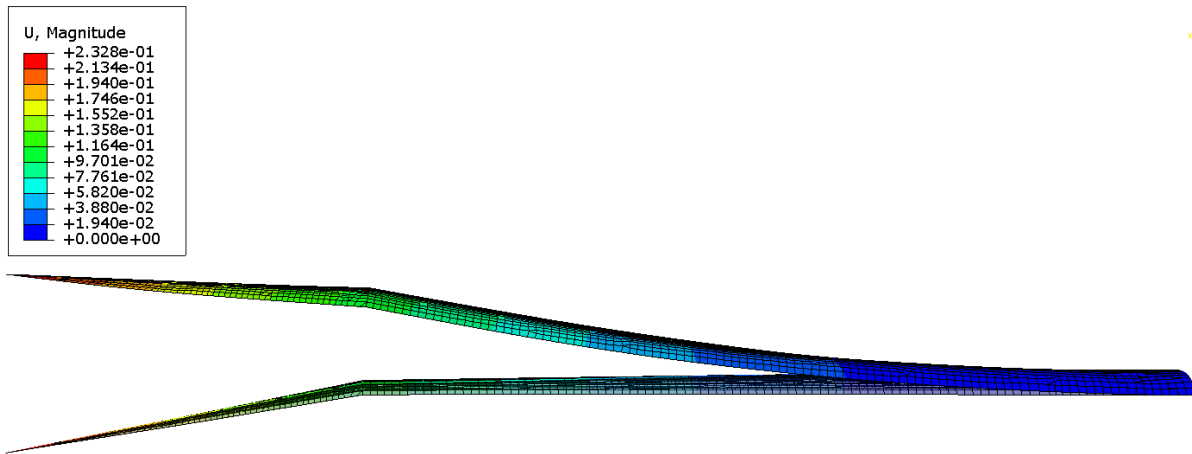
Rezultati nelinearne analize čvrstoće prvog tehničkog sustava provedene metodom konačnih elemenata u programu Abaqus prikazani su na slikama 6.5.1. do 6.5.4. Prema analizi najveće naprezanje iznosi 119.2 MPa i nalazi se na spoju kosti *humerus* i *ulna*. Najveći pomak konstrukcije je na vrhu krila i iznosi 23 cm.



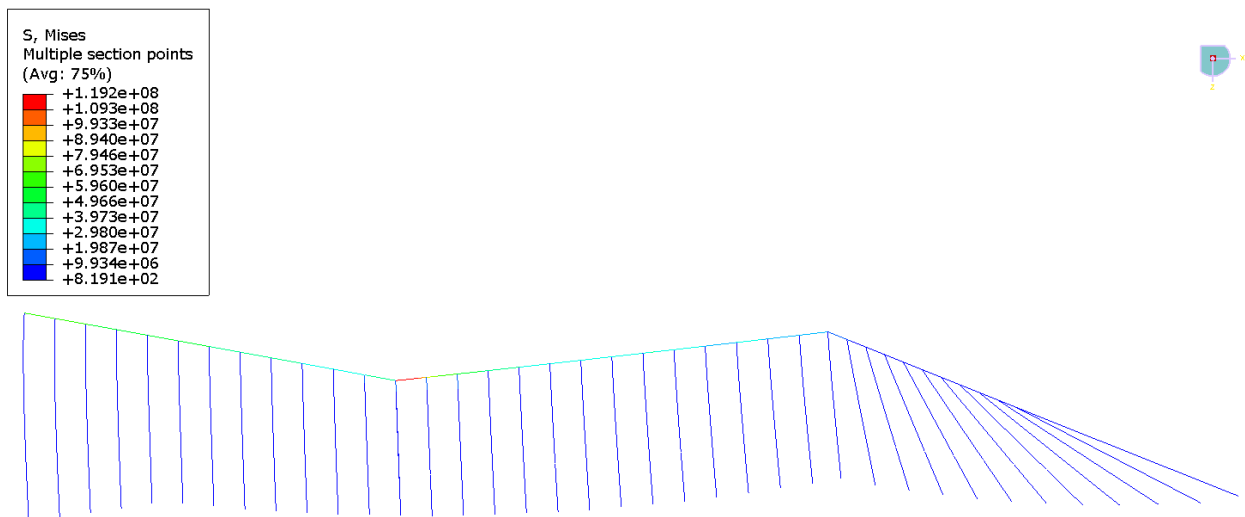
Slika 6.5.1 Ekvivalentno naprezanje prvog tehničkog sustava prema V.Mises-u [Pa]



Slika 6.5.2 Pomaci krila prvog tehničkog sustava [m]



Slika 6.5.3 Ekvivalentno naprezanje prvog tehničkog sustava prema V.Mises-u [Pa]

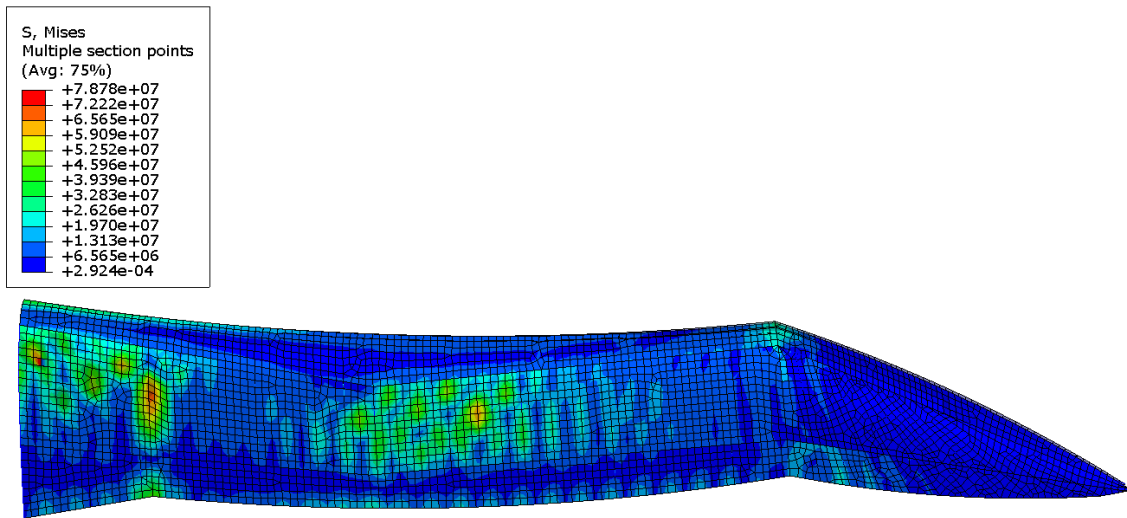


Slika 6.5.4 Naprezanja krila u grednim elementima prvog tehničkog sustava [Pa]

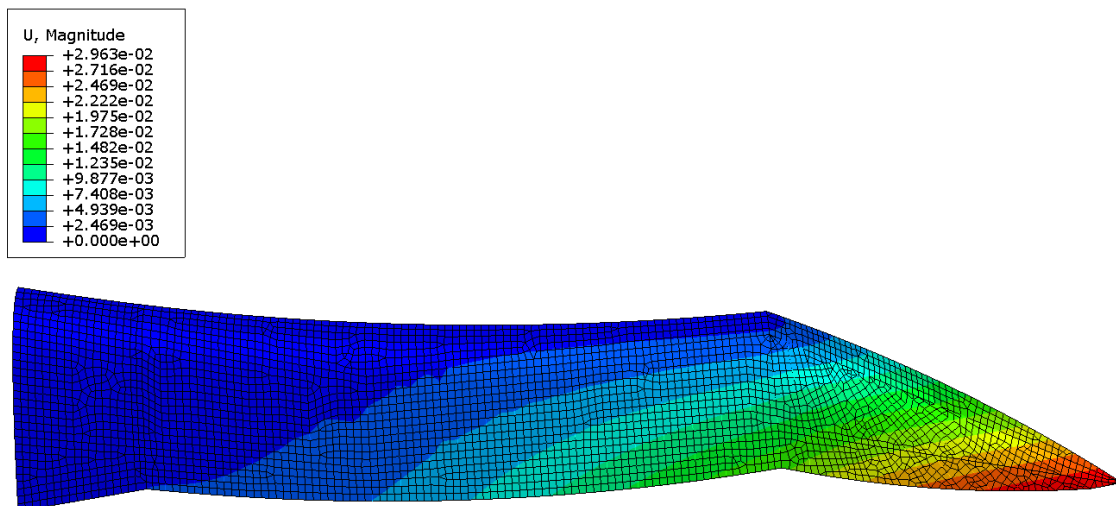
## 6.6. Nelinearna analiza drugog tehničkog sustava

Rezultati nelinearne analize čvrstoće drugog tehničkog sustava provedene metodom konačnih elemenata u programu Abaqus prikazani su na slikama 6.6.1. do 6.6.4. Za razliku od ostalih analiza kod kompozitne konstrukcije najveće naprezanje iznosi 78.7 MPa i nalazi se na oplati blizu spoja krila s trupom. Ovo je uzrokovano boljim

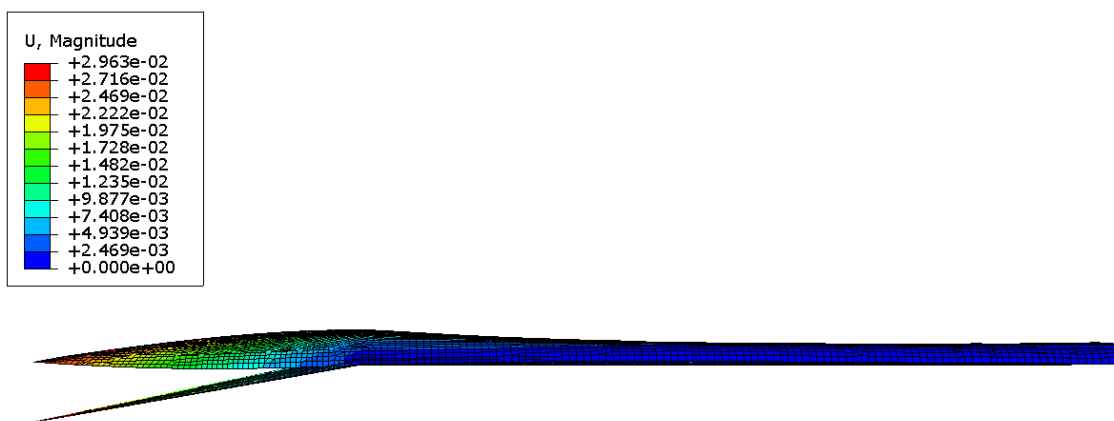
elastičnim svojstvima materijala oplata koja je čvršća pa samim time preuzima veća naprezanja. Najveći pomak konstrukcije je na vrhu krila i iznosi 2.9 cm.



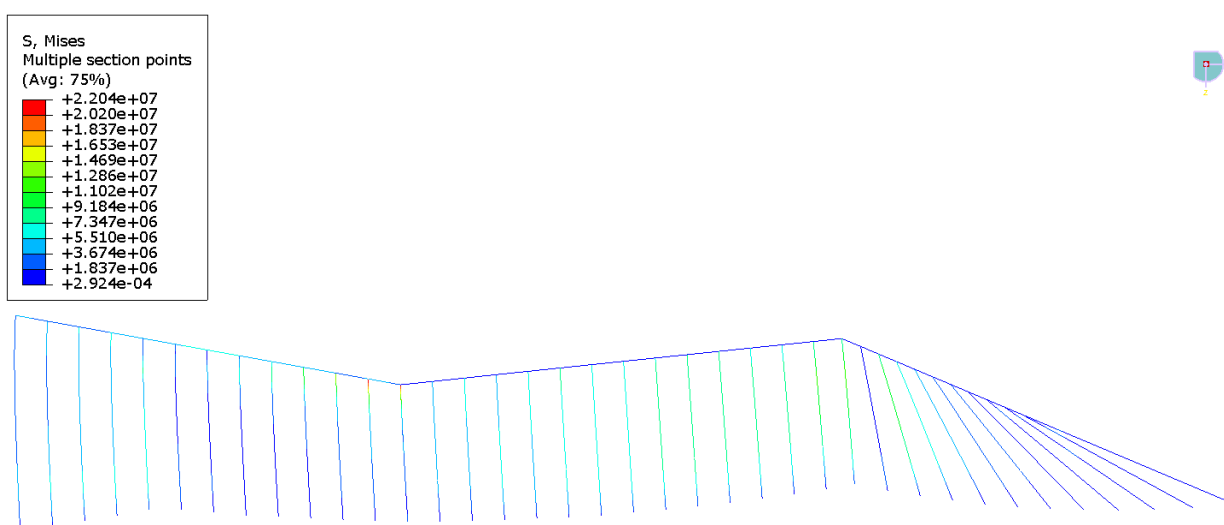
Slika 6.6.1 Ekvivalentno naprezanje drugog tehničkog sustava prema V.Mises-u [Pa]



Slika 6.6.2 Pomaci krila drugog tehničkog sustava [m]



Slika 6.6.3 Ekvivalentno naprezanje drugog tehničkog sustava prema V.Mises-u [Pa]. Prikaz sa faktorom povećanja 3



Slika 6.6.4 Naprezanja krila u grednim elementima drugog tehničkog sustava [Pa]



## 6.7. Usporedba rezultata

Masa stvarnog krila albatrosa iznosi 0.71 kg. Ovaj podatak je zadovoljavajući obzirom da prema [21] masa jednog krila ptice u prosjeku iznose 7-8 % ukupne mase ptice. Tehnički sustavi su konstruirani tako da imaju masu istog iznosa kao masa stvarnog sustava. Ovo je izvedeno tako da su smanjene površine i poprečni presjeci oplata i greda kako bi zadovoljili zadanu masu krila.

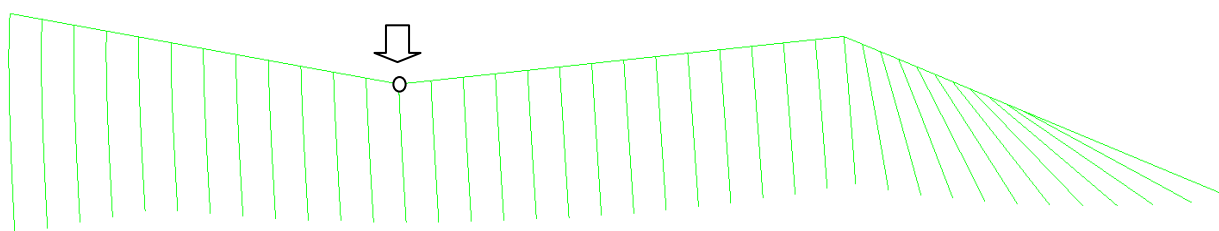
Tablica 6.6.1. prikazuje rezultate za sva tri analize. Analiza ekvivalentnih naprezanja prema V. Mises-u pokazuje kako stvarno krilo ima manja naprezanja od tehničkih sustava, međutim razlog ovome je optimizacija prema masi tehničkih sustava koji imaju manje promjere grednih elemenata i debljinu oplata, ali su izrađeni od krućih materijala. Analiza prikazuje maksimalna odstupanja krila koja se događaju na samom vrhu krila. Pomaci stvarnog krila iznose 21.4 cm i prvi tehnički sustav ima slično odstupanje od 17.1 cm. Razlog sličnosti leži u odabiru materijala oplata i nosivih greda pera prvog tehničkog sustava. Naime kako je prikazano u tablici 5.5.2. polikarbonat ima mehanička svojstva blizu mehaničkim svojstvima keratina. Drugi tehnički sustav koji je izrađen u potpunosti od kompozitnog materijala ima najmanje pomake u vrhu krila od samo 3.7 cm što je znatno bolje od ostala dva sustava. Glavni razlog ovome su odlična mehanička svojstva kompozitnog materijala s relativno malom gustoćom.

U slučaju analize stvarnog krila i prvog tehničkog slučaja maksimalna naprezanja se nalaze na grednim elementima na spoju kosti *humerus* i *ulna*. Prema analizi drugog tehničkog sustava maksimalna naprezanja se nalaze na oplati krila blizu spoja krila s tijelom ptice. Kako je ranije spomenuto razlog ovome su znatno bolja mehanička svojstva materijala oplata izrađene od kompozita.

Tablica 6.6.1 Rezultati linearne i nelinearne analize

Analiza	Linearna analiza		Nelinearna analiza	
	Maksimalna naprezanja [MPa]	Maksimalni pomaci [cm]	Maksimalna naprezanja [MPa]	Maksimalni pomaci [cm]
Stvarno krilo	22.15	21.4	61.6	37
Prvi tehnički sustav	66.33	17.1	119.2	23
Drugi tehnički sustav	44.6	3.7	78.7	2.9

Usporedba rezultata pomaka u zglobu kosti *humerus* i *ulna*. Ovaj čvor je interesantan obzirom da se u analizama za prirodni i prvi tehnički sustav, u njemu javljaju maksimalne vrijednosti naprezanja. Slika prikazuje lokaciju čvora.

Slika 6.6.5 Čvor spoja kosti *humerus* i *ulna*

Tablica 6.6.2. prikazuje rezultate pomaka navedenog čvora gdje se vidi da linearna i nelinearna analiza imaju slične rezultate u svakom od tri analizirana slučaja.

Tablica 6.6.2 Pomak čvora u spoju kosti *humerus* i *ulna*

Analiza	Maksimalni pomaci [cm]	
	Linearna analiza	Nelinearna analiza
Stvarno krilo	2.57	2.89
Prvi tehnički sustav	2.21	2.29
Drugi tehnički sustav	0.2	0.2

## 7. Zaključak

---

U ovom radu prikazani su biološki leteći sustavi s posebnim naglaskom na let ptica. Kroz rad su prikazani razni konstrukcijski elementi ptica uz detaljnu obradu najvažnijih elemenata. Krilo ptice se pokazalo kao izuzetno komplicirana i čvrsta konstrukcija koju nije jednostavno pretvoriti u tehnički sustav. U radu su prikazani konstrukcijski elementi krila koji omogućuju ostvarivanje dodatnog uzgona krila. Ovi elementi se mogu pronaći i na današnjim zrakoplovima kao zakrilca, pretkrilca i sl. Obrađeni su svi važniji načini leta koji se u osnovi mogu podijeliti na mahanje i jedrenje. Obično manje ptice imaju krila razvijena za mahanje dok velike sa svojim vitkim krilima jedre. Kao najzanimljiviji element krila se pokazalo pero, koje sa svojom kompleksnom konstrukcijom građenom od keratina tvori izrazito otpornu oplatu krila.

Za analizu čvrstoće elementa biološkog sustava odabrano je krilo albatrosa. Obzirom da je albatros najveća ptica na svijetu s visokom vitkošću krila koje je optimizirano za jedrenje, opterećenje krila je pretpostavljeno jednolično po cijeloj površini krila. Cilj rada je bio izvršiti analizu čvrstoće konstrukcije pomoću metode konačnih elemenata koristeći program Abaqus. Krilo ptice je pojednostavljeno na kostur i oplatu krila koju čine pera. Prva analiza je provedena sa svojstvima materijala stvarne ptice. Nakon dobivene analize stvarnog krila provedene su dvije analize tehničkog krila koji su imali masu istu kao stvarno krilo. Prva analiza tehničkog krila predstavlja

krilo proizvedeno od materijala koji se koriste u današnje doba. Druga analiza tehničkog krila predstavlja krilo proizvedeno od materijala koji bi mogli biti tehnički uobičajeni u narednih deset godina.

Analize su pokazale kako prvi tehnički sustav veoma dobro slijedi stvarni sustav ptice iako su naprezanja dvostruko veća nego u stvarnom krilu. Analiza drugog tehničkog sustava prikazuje izrazito kvalitetnu konstrukciju koja smanjuje pomake krila do deset puta uz istu masu krila. Naravno da ovi podaci na prvi pogled odišu optimizmom kako je vrlo jednostavno napraviti konstrukciju krila ptice sa puno boljim svojstvima. Međutim, ako bi uvrstili potrebne uređaje za ostvarivanje uzgona poput zakrilaca, pretkrilaca i sl. masa krila bi osjetno porasla. Budućnost izrade optimiziranih krila zrakoplova leži upravo u izradi svih pomoćnih sustava krila što lakšima i jednostavnijima.

## 8. Literatura

---

- [1] [http://commons.wikimedia.org/wiki/Main\\_Page](http://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page)
- [2] <http://wthielicke.gmxhome.de/bionik/indexuk.htm>
- [3] [www.mercede-benz.com](http://www.mercede-benz.com)
- [4] Videler, J. :Avian flight, Oxford University Press, Nizozemska,2005.
- [5] Azuma, A.:The Biokinetics of flying and swimming/second edition, AIAA Education Series, Tokio, 2005.
- [6] <http://discoveryofdesign.com/id21.html>
- [7] [http://www.ucmp.berkeley.edu/education/lessons/xenosmilus/skeletal\\_res\\_manual2.html](http://www.ucmp.berkeley.edu/education/lessons/xenosmilus/skeletal_res_manual2.html)
- [8] Pennycuick, C.J.: Modeling the flying bird, Elsevier Science, Englesk. 2007.
- [9] <http://photography.nationalgeographic.com/wallpaper/photography/photos/patterns-scales-feathers/sparrow-feathers-murphy/>
- [10] [http://commons.wikimedia.org/wiki/Main\\_Page](http://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page)
- [11] <http://www.illustrationsource.com/stock/image/481308/details-of-a-feather-showing-the-shaft-quill-and-barbs/>

- [12] Bonser, R., Purslow, P.: The young's modules of feather keratin, The Journal of Experimental Biology, Engleska, 1994.
- [13] <http://www.tmfc.org.uk/ds/darkside.html>
- [14] <http://ngm.nationalgeographic.com/2007/12/albatross/safina-text.html>
- [15] <http://www.rcgroups.com/forums/attachment.php?attachmentid=977425>
- [16] McAlister, G., Moyle D.,: Some mechanical properties of goose femoral cortical bone, Journal of biomechanics, 1983.
- [17] MIL-HDBK-5J : Metalic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures, Department of Defense Handbook, Atlantic City, 2003.
- [18] Kraut, B.: Krautov strojarski priručnik, Axiom d.o.o., Zagreb, 1997.
- [19] Gay, D., Hoa, S.V., Tsai, S.W: Composite Materials: Deisgn and application, CRC Press, 2003.
- [20] Smojver, I.,: Mehanika kompozitnih materijala, Zagreb 2007.
- [21] Berg, C., Rayner, J. : The moment of inertia of bird wings and the inertial power requirement for flapping flight, Department of Zoology, University of Bristol, 1995.